

ANÁLISE ESTRUTURAL DE LAJES PRÉ-FABRICADAS UTILIZANDO VIGOTAS PROTENDIDAS E TAVELAS DE EPS

Structural analysis of prefabricated slabs using prestressed beams and EPS slabs

Jean Carlos Paza¹; Murillo de Mattos Marchetto², Diniane Baruffi³; Suelen Cristina Vanzeto⁴

¹ Diplomado em Engenharia Civil pela Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai, Erechim, Brasil. *E-mail*: amandamosele@yahoo.com.br

² Diplomado em Engenharia Civil pela Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai, Erechim, Brasil. *E-mail*: amandamosele@yahoo.com.br

³ Doutora em Engenharia pela Universidade de Passo Fundo – UPF. Professora do curso de Engenharia Civil da Universidade Regional do Alto Uruguai e das Missões – URI – Câmpus de Erechim, Brasil. *E-mail*: dinianebaruffi@uricer.edu.br

⁴ Mestre em Ciências e Tecnologias Ambientais - UTFPR. Professora do curso de Engenharia Civil da Universidade Regional do Alto Uruguai e das Missões – URI – Câmpus de Erechim, Brasil. *E-mail*: suelen@uricer.edu.br

Data do recebimento:02/02/2022 - Data do aceite: 11/05/2022

RESUMO: O concreto protendido vem crescendo na indústria da construção civil. Com isso, as lajes pré-fabricadas protendidas ganham espaço e substituem as lajes maciças moldadas *in loco*. Com o objetivo de avaliar, experimentalmente, lajes pré-fabricadas protendidas, esse artigo busca avaliar o desempenho estrutural de lajes executadas com vigotas de concreto protendidas, elementos de preenchimento de EPS (poliestireno expandido) e capa de concreto. Para fins de comparação são ensaiados dois sistemas, o primeiro com vigotas em arranjo simples e o segundo com vigotas em arranjo duplo. Os protótipos em escala real são submetidos a carregamentos para verificar os deslocamentos no centro do vão e comparar com os deslocamentos admissíveis segundo a NBR 6118/2014. A partir dos resultados obtidos, é constatado que os deslocamentos para os dois protótipos se mostraram duas vezes inferiores aos deslocamentos admissíveis, apresentando um desempenho estrutural adequado. Porém, para as mesmas condições de sobrecarga e vãos, a laje

com vigotas protendidas em arranjo duplo, apresentam deslocamentos cerca de 20% inferiores que a laje com vigotas protendidas em arranjo simples.

Palavras-chave: Concreto protendido. Estruturas. Deslocamentos limites.

ABSTRACT: Precast concrete has been growing in the construction industry, as a result, the precast prestressed slabs have been gaining space and replacing the solid slabs molded *in situ*. With the objective of experimentally evaluate precast prestressed slabs, this article seeks to evaluate the structural performance of slabs executed with prestressed concrete beams, EPS (expanded polystyrene) infill elements and concrete cover. For comparison purposes, two systems are tested, the first with joists in a single arrangement and the second with joists in a double arrangement. The full-scale prototypes are subjected to loads to verify the displacements in the center of the span and compare with the admissible displacements according to NBR 6118/2014. From the results obtained, it is verified that the displacements for the two prototypes were twice inferior to the admissible displacements, presenting an adequate structural performance. However, for the same overload conditions and spans, the slab with prestressed beams in double arrangement have displacements about 20% lower than the slab with prestressed beams in single arrangement.

Keywords: Precast concrete. Structures. Limit displacements.

Introdução

Conforme Bastos (2015), as lajes, em geral, são classificadas como elementos planos bidimensionais, recebendo a maior parte das ações aplicadas numa construção, normalmente de pessoas, móveis, pisos, paredes, e os mais diversos tipos de carga que podem existir devido à aplicação da estrutura. Essas ações são frequentemente perpendiculares ao plano da laje, podendo ser divididas em distribuídas na área, distribuídas linearmente ou forças concentradas.

O emprego de lajes formadas por vigotas pré-fabricadas, antes limitada a edificações de pequeno e médio porte, vem se tornando cada vez mais usual também em grandes obras, como edifícios de muitos andares, com grandes vãos, inclusive em pontes. “A

escolha desta solução de laje possui muitas vantagens, entre elas pode-se destacar a facilidade de manuseio, de montagem, redução do escoramento e a eliminação do uso de formas para as lajes” (FERREIRA, 2015, p. 1).

De acordo com Catoia, Ferreira e Pinheiro (2016), o emprego das estruturas pré-fabricadas permite obter significativa eficiência estrutural, com o emprego de elementos mais esbeltos. Além disso, garante o uso otimizado dos materiais, com redução do desperdício de recursos. Assim, o uso desse sistema possibilita a obtenção de edifícios com maiores áreas e vãos livres comparados aos convencionais, o que pode ser observado nas dimensões de lajes usuais do sistema.

Com o intuito de otimizar tempo e diminuir a mão de obra, as lajes pré-fabricadas têm sido uma melhor opção às moldadas em obra, afirma Moraes (2020), ainda mais com o crescente aumento de valores dos materiais

de construção. Portanto, a utilização desse tipo de sistema em construções vem como alternativa para atender a esse propósito.

Bezerra e Nunes (2020) também reiteram que as lajes pré-fabricadas apresentam um baixo custo de produção, simples execução, não exigindo mão de obra altamente qualificada para executá-las, segurança e um bom desempenho no decorrer do tempo. Além de se caracterizarem por um sistema de alta demanda, com inúmeras empresas de fabricação de vigotas de concreto armado, concreto protendido e vigotas treliçadas, fabricando esse modelo em grande estoque.

Alguns estudos na área foram desenvolvidos, a exemplo de Coronetti (2003), que submeteu dois modelos experimentais de laje pré-fabricada, com três vigotas de concreto armado de duas empresas distintas, tavelas cerâmicas como elementos de preenchimento e capa de concreto a um carregamento uniformemente distribuído, utilizando água como carga. A fim de verificar a resistência da laje à carga de trabalho, comparou os deslocamentos no centro do vão de cada laje experimental com os obtidos através do cálculo analítico, observando que para ambas empresas, os resultados indicaram que as flechas de cada laje experimental foram aceitáveis, menores do que o a flecha máxima admissível prevista por norma, porém, as flechas determinadas analiticamente foram superiores à norma, neste caso, o autor sugeriu como solução adotar tavelas cerâmicas maiores, aumentando a altura total da laje.

Oliveira (2015) realizou ensaios em vigotas pré-moldadas de concreto armado verificando que os modelos experimentais apresentaram valores de resistência superiores em relação a NBR 6118/2014. Já Silva (2019) realizou ensaios em seis protótipos de lajes pré-fabricadas, sendo três lajes com vigotas protendidas e três lajes com vigotas treliçadas, executadas com tavelas cerâmicas

e capa de concreto, com aplicação de uma carga pontual em três pontos distintos no comprimento linear da laje até a ruptura, para verificação de cargas e flechas. O autor observou que a laje com vigotas protendidas apresentou valores de carga 110,10 % superiores aos da laje com vigotas treliçadas, com ambas situações atendendo à flecha admissível estabelecida pela NBR 6118. Silva também realizou um breve estudo de custos, onde os materiais e componentes utilizados para execução da laje protendida apresentaram um custo 29 % inferior do que a laje treliçada, por metro quadrado de laje.

Sendo assim, com um foco diferente dos observados nos estudos acima, o objetivo deste estudo é analisar o desempenho estrutural de lajes pré-fabricadas protendidas em dois sistemas usuais em empresas que atuam na área: um sistema envolve a utilização de vigotas protendidas em arranjos simples (VPS) e o outro baseia-se no uso de vigotas protendidas em arranjos duplos (VPD), sistema utilizado para resistir a carregamentos superiores, por meio de ensaios experimentais em protótipos de escala real. O desempenho estrutural das lajes é verificado através de deslocamentos limites na estrutura de acordo com as orientações da NBR 6118 (ABNT, 2014), utilizados para verificação em serviço de deformações excessivas da estrutura.

Concreto Protendido

Conforme Sanabra-Loewe e Capellà-Llovera (2014), a protensão se dá pela aplicação de cargas externas sobre a estrutura, com o intuito de permitir uma resistência maior com relação a cargas de serviço. O concreto protendido é um tipo específico de concreto armado que possui características particulares com relação ao seu procedimento de cálculo, materiais e concretagem (GILBERT; MICKLEBOROUGH; RANZI, 2017).

Um elemento estrutural utilizando da protensão recebe uma carga de compressão previamente à aplicação de qualquer outra carga externa (DAHMAN et al., 2021; GILBERT; MICKLEBOROUGH; RANZI, 2017). Esse processo tem a finalidade de reduzir, ou até mesmo de eliminar, as forças de tração internas, o que por consequência acaba controlando a fissuração do elemento, aproveitando ao máximo de sua característica mais favorável. Essa compressão imposta na peça é gerada pelo alto tensionamento de barras de aço que acabam reagindo no concreto. Com isso, possui uma rigidez e resistência a fissuras comparativamente mais elevada em relação ao concreto armado, que geralmente se apresenta fissurado ao longo de sua seção transversal (GILBERT; MICKLEBOROUGH; RANZI, 2017; MARČIUKAITIS; JUKNEVIČIUS, 2017).

Além disso, a força de protensão imposta no elemento gera forças internas opostas a qualquer carga externa que seja aplicada sobre o mesmo, gerando uma redução significativa, ou até mesmo total, dos deslocamentos na peça (GILBERT; MICKLEBOROUGH; RANZI, 2017).

Com estes fatos assimilados é possível perceber que a protensão produz um bom desempenho e segurança em comparação com o concreto convencional, tendo como vantagens, segundo Cholfe e Bonilha (2018):

- a) Durabilidade: a protensão proporciona uma seção transversal com uma redução significativa ou até mesmo total de fissuras, impedindo, dessa forma, o desenvolvimento da corrosão das armaduras, aumentando, assim, a vida útil da estrutura.
- b) Deformabilidade: as forças de protensão possuem uma capacidade de suporte de cargas mais elevadas e, assim, a estrutura acaba tendo flechas com menores proporções, o que garante à peça um acabamento de maior qualidade.

Os deslocamentos (flechas) são ocasionados devido às cargas externas sobre as peças, peso próprio do elemento e a força de protensão aplicada na peça. A aplicação da protensão no concreto com uma excentricidade gera uma deflexão contrária daquela gerada pela carga própria e externa ao elemento, assim equilibrando as forças que, por consequência, acabam neutralizando ao máximo a deflexão na peça. No entanto, deve-se notar que durante a liberação dos cabos de protensão aplicados com uma excentricidade, o concreto deve possuir uma resistência de, pelo menos, 70% de sua resistência característica à compressão (f_{ck}) (MARČIUKAITIS; JUKNEVIČIUS, 2017).

No concreto protendido, tem-se diferentes sistemas para aplicação de protensão nas peças, como: pós-tração com aderência, pós-tração sem aderência e pré-tração. A NBR 6118 (ABNT, 2014) define a pós-tração com aderência como a protensão cujo o pré-alongamento da armadura ativa é realizado após a concretagem e cura da peça. Este tipo de protensão também é denominado de pós-tensão com aderência posterior, já que a aderência entre a armadura e o concreto ocorre apenas após o preenchimento da bainha.

Segundo Porto (2019), no sistema de pós-tração sem aderência, a protensão também é realizada após a concretagem e quando alcançada a resistência ideal da peça, nesse caso, são utilizados, geralmente, cordoalhas engraxadas revestidas com uma capa de PEAD (polietileno de alta densidade), de forma que não haja contato entre o fio de aço e o concreto.

Já a pré-tração ou também denominada de protensão com aderência inicial, o pré-alongamento dos cabos é realizado antes da concretagem da peça. Realiza-se, então, a concretagem da peça após o concreto atingir a resistência especificada em projeto, liberam-se os cabos do macaco de protensão,

transferindo os esforços diretamente para o concreto através do atrito com a armadura ativa (ABNT, 2014).

Para os deslocamentos-limites definidos pela NBR 6118 são utilizados para a verificação de uma estrutura em serviço, ou seja, estado limite de serviço (ELS). Para as estruturas com deslocamentos limites em elementos estruturais, a flecha total deve ser inferior ao vão dividido por 250 ($L/250$) (ABNT, 2014).

Nesse contexto, os ensaios experimentais analisados nesse artigo buscam apresentar um valor comparativo de deslocamentos limites com a NBR 6118/2014, considerando que as lajes avaliadas são executadas com vigotas protendidas pré-fabricadas e, espera-se que os deslocamentos sejam inferiores aos definidos em norma.

Metodologia

O intuito do estudo é analisar experimentalmente o desempenho de lajes pré-fabricadas com vigotas protendidas e tabelas de EPS (poliestireno expandido) em dois sistemas usuais na construção civil: VPS (vigota protendida simples) e VPD (vigota protendida dupla).

O primeiro protótipo de laje pré-fabricada foi executado com vigotas protendidas em um arranjo simples, ou seja, uma vigota protendida seguida de uma tavela de EPS. As vigotas empregadas para este protótipo de laje possuem em sua seção 4 fios protendidos CP 175 RB na posição 3010 (nome dado a vigota), conforme elucidado na Figura 1 a). O segundo protótipo de laje pré-fabricada foi realizado com vigotas protendidas em um arranjo duplo, onde duas vigotas protendidas são dispostas na laje seguidas por uma placa de EPS. As vigotas aplicadas para o protótipo de laje em questão possuem em sua seção 5 fios protendidos CP 175 RB na

posição 3110 (nome dado a vigota), conforme Figura 1 b). Para ambos protótipos, os elementos de preenchimento de EPS usados possuem $8 \times 30 \times 100$ cm, e juntamente com o capeamento em concreto de 4 cm também constituem a altura total da laje de 12 cm e a carga de protensão aplicada aos cabos é de aproximadamente 2,5 MPa, para cada fio de protensão.

As lajes foram dimensionadas conforme método utilizado pela empresa cedente do material. O sistema de VPS foi dimensionado para um vão de 4,0 m com uma sobrecarga de projeto de 350 kgf/m^2 , sendo considerada uma laje retangular de 8 m^2 ($2,0 \text{ m} \times 4,0 \text{ m}$), Figura 3. Já o sistema de VPD, o vão considerado precisou ser aumentado para 4,15 m para o método de dimensionamento aplicado pela empresa, considerando a largura e a concepção da laje com duas vigotas e uma tavela de EPS, sendo considerado uma laje retangular de $8,3 \text{ m}^2$ ($2 \text{ m} \times 4,15 \text{ m}$) com uma sobrecarga de projeto de 700 kgf/m^2 , Figura 2. As vigotas foram apoiadas ao longo do comprimento, para análise de um vão superior.

Figura 1 - VP – Vigota com Armadura Protendida.

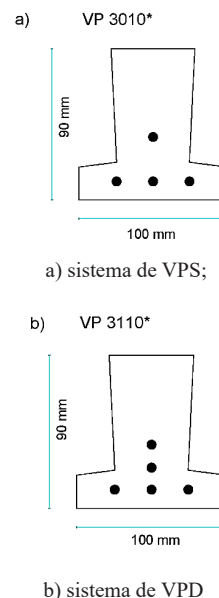


Figura 2: Modelo representativo da laje pré-fabricada com VPD e EPS

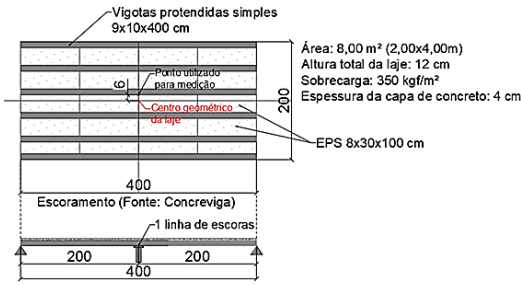


Figura 3: Modelo representativo da laje pré-fabricada com VPS e EPS

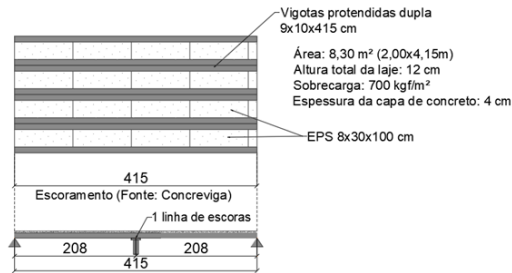
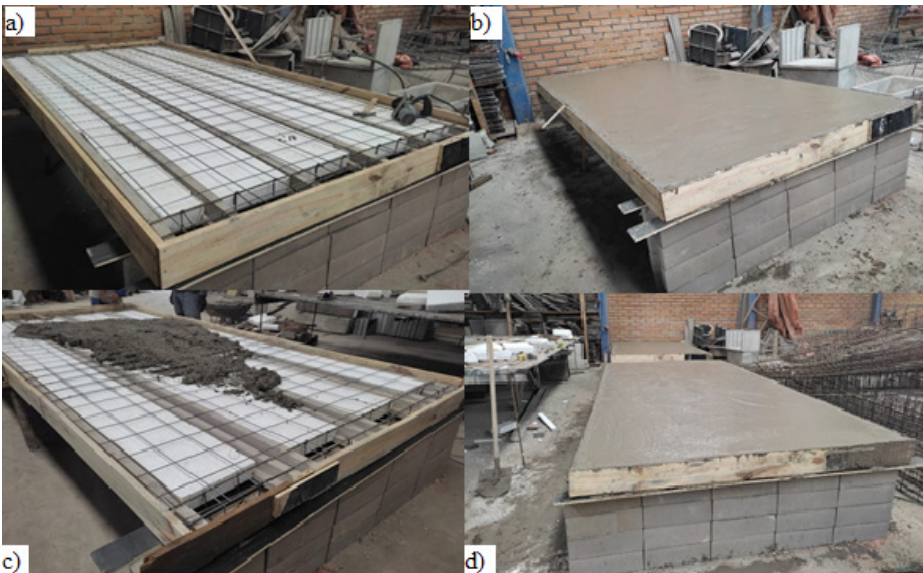


Figura 4: Montagem dos protótipos



a) distribuição de vigotas e telas para o sistema VPS e malha de aço; **b)** concretagem do protótipo VPS; **c)** distribuição de vigotas e telas para o sistema VPD com malha de aço e início da concretagem; **d)** concretagem do protótipo em VPD.

Protótipos para os ensaios experimentais

Os protótipos foram executados na empresa que cedeu o material e o espaço para a realização dos ensaios. Foram executadas duas paredes de blocos de concreto maciço, dimensão 14x19x39 cm com altura de 56 cm para apoiar a estrutura e possibilitar a leitura dos deslocamentos nos relógios comparadores. Ambas as lajes contêm a tela de 15x15 cm, com aço CA-60 como armadura de distribuição e capa de concreto de 4 cm. A Figura 4 apresenta a montagem das estruturas.

Foi realizada a cura úmida do concreto utilizado na capa dos protótipos durante 7 dias e retirados corpos de prova para avaliar a resistência do concreto à compressão em 7 dias (f_{c7}) e a resistência do concreto à compressão característica (f_{ck}) aos 28 dias, tanto do concreto utilizado na execução das vigotas como para o concreto utilizado na capa da laje.

Arranjo Experimental

A aplicação da carga nas lajes foi realizada com bolsas de cimento de 50 kg, com dimensões de 40x60 cm distribuídas uniformemente pela área. Para a análise e leitura dos deslocamentos no centro do vão de cada protótipo foram utilizados, para cada laje, um relógio comparador analógico de 30 mm, fixado em uma base magnética, Figura 5.

Para a execução dos ensaios foram necessárias algumas adaptações nos projetos das lajes. Inicialmente ocorreu uma variação

nas dimensões das lajes que são apresentadas na Tabela I. Ainda, ressalta-se que todas as definições de carregamento para os ensaios foram adaptadas seguindo o modelo de laje real executado em obras.

Outra adaptação necessária se refere ao ponto utilizado para instalação do relógio comparador e leitura dos deslocamentos na laje pré-fabricada com VPS. Foi necessário deslocar a medição 6 cm do centro geométrico da laje com a finalidade de realizar a leitura na vigota de concreto, que apresenta maior rigidez, em vez do EPS.

Figura 5: Arranjo experimental com relógio comparador



Tabela I: Variação quanto as dimensões de projeto e executadas das lajes pré-fabricadas com VPS e VPD

	Laje com VPS				Laje com VPD			Variação das áreas (%)
	Largura (m)	Comprimento (m)	Área (m ²)	Variação das áreas (%)	Largura (m)	Comprimento (m)	Área (m ²)	
Dimensões de Projeto	2,00	4,00	8,00	4,00	2,00	4,15	8,30	4,82
Dimensões Executadas	1,92	4,00	7,68		1,90	4,16	7,90	

Procedimento de ensaio

Foram realizados três carregamentos para cada uma das lajes executadas totalizando 6 ensaios. Para a laje de VPS a sobrecarga de dimensionamento foi de 350 kgf/m². Durante o primeiro ensaio da laje com VPS, ao atingir o carregamento aproximado de dimensionamento de 350 kgf/m² foi aumentada a progressão de carregamento até alcançar, aproximadamente, 500 kgf/m² para os três ensaios.

Já para a laje pré-fabricada com VPD, a sobrecarga de projeto foi de 700 kgf/m². Nesse caso, pela dificuldade em atingir a sobrecarga de projeto, não foi aplicada uma sobrecarga superior.

O procedimento de ensaio consistiu em:

- instalar os relógios comparadores e zerar as medições;
- aplicar o carregamento em etapas com as bolsas de cimento;
- realizar a leitura dos deslocamentos nos relógios comparadores a cada incremento de carga;
- retirar a carga aplicada na laje.

Resultados e Discussão

A seguir, apresentam-se os resultados obtidos quanto à resistência à compressão do concreto utilizado na capa de compressão e nas vigotas, os deslocamentos verificados nos dois arranjos para as lajes pré-fabricadas com vigotas protendidas (VPS e VPD) e as discussões sobre o trabalho.

Resistência do concreto

Os valores de resistência f_{cj} , resistência do concreto à compressão em j dias, nesse caso a avaliação foi aos 7 dias e f_{ck} , resistência característica à compressão aos 28 dias para o

concreto utilizado na capa de compressão de ambas as lajes e para o concreto utilizado na fabricação das vigotas protendidas empregadas, que podem ser observados na Tabela II.

Observa-se que as resistências do concreto ficaram abaixo do estipulado em projeto, 25 MPa e 40 MPa, para a capa de compressão e vigotas, obtendo aos 28 dias uma resistência média de 10,27 MPa e 24,41 MPa, respectivamente. A resistência f_{cj} aos 7 dias não atingiu aos 70% da resistência de projeto das vigotas definidas como a resistência necessária para aplicação da protensão que seria de 28 MPa. Esses resultados fizeram com que a empresa cedente do espaço e do material para pesquisa ajustasse a dosagem do traço do concreto e melhorasse o controle de qualidade.

Deslocamentos para a laje com VPS

Os deslocamentos verificados no ensaio para o arranjo VPS podem ser observados na Tabela III. O deslocamento limite definido pela NBR 6118/2014 considerado para o estudo (L/250) seria de 14,4 mm. Para a sobrecarga de projeto considerada (350 kgf/m²) observa-se que o deslocamento médio foi 4,16 mm, cerca de 29% do deslocamento limite. E considerando um incremento de carga até, aproximadamente, 500 kgf/m², o deslocamento observado foi 6,54 mm, cerca de 45% do permitido pela NBR 6118/2014.

Observa-se, também, para a repetição dos ensaios, ocorreu um crescimento dos deslocamentos. Os deslocamentos residuais ao final dos ensaios não foram avaliados, os relógios eram zerados antes da repetição do carregamento, mas acredita-se que esse fato influenciou nesta observação, devido à repetição dos ensaios nos mesmos protótipos.

Deslocamentos para a laje com VPD

Os deslocamentos medidos no ensaio experimental para o arranjo VPD podem ser

Tabela II - Resistência dos corpos de prova de concreto

Tipo de Concreto	Idade: 7 dias*	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Idade: 28 dias	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)
Capa de compressão	7,89	7,23	0,83	11,11	10,27	0,91
	6,30			9,30		
	7,49			10,42		
Vigotas	18,88	18,31	0,50	26,36	24,41	1,69
	18,11			23,48		
	17,95			23,38		

*Os CP's do concreto utilizado nas vigotas foram rompidos no ato da protensão, realizado aos 7 dias.

Tabela III: Deslocamentos (δ) para a laje com VPS

Carregamento	δ_1 (mm)	δ_2 (mm)	δ_3 (mm)	δ médio (mm)	DP (mm)
20 bolsas (130 kgf/m ²)	0,95	1,35	1,61	1,30	0,33
40 bolsas (260 kgf/m ²)	2,88	3,2	3,2	3,09	0,18
54 bolsas (352 kgf/m ²)	3,62	4,13	4,73	4,16	0,56
74 bolsas (482 kgf/m ²)	5,64	5,57	6,73	5,98	0,65
77 bolsas (501 kgf/m ²)	6,48	6,11	7,03	6,54	0,46

Para a laje com VPS, o ponto de leitura dos deslocamentos localizou-se 6 cm do centro geométrico.

Tabela IV: Deslocamentos para a laje com VPD

Carregamento	δ_1 (mm)	δ_2 (mm)	δ_3 (mm)	δ médio (mm)	DP (mm)
20 bolsas (127 kgf/m ²)	0,15	1,40	1,6	1,05	0,79
40 bolsas (253 kgf/m ²)	2,20	2,50	3,1	2,60	0,46
54 bolsas (342 kgf/m ²)	3,20	3,65	3,95	3,60	0,38
74 bolsas (468 kgf/m ²)	4,60	4,86	5,15	4,87	0,28
79 bolsas (500 kgf/m ²)	5,02	5,37	6,2	5,53	0,61
111 bolsas (703 kgf/m ²)	8,63	8,00	9,3	8,64	0,65

observados na Tabela IV. Para a sobrecarga de projeto considerada (700 kgf/m²) o deslocamento médio obtido nos ensaios foi 8,64 mm, cerca de 58% do deslocamento limite indicado pela NBR 6118/2014 considerado para o estudo (L/250) de 15 mm.

Novamente, é observado o crescimento dos deslocamentos medidos na laje com as repetições dos carregamentos, embora não se tenha observado o deslocamento residual e foi tomado o cuidado para zerar os relógios comparadores, pondera-se ser o reflexo da repetição dos ensaios no mesmo protótipo.

Comparação de deslocamentos entre lajes com VPS e VPD

De acordo com os ensaios experimentais, o desempenho de ambos os protótipos de laje pré-fabricada com vigotas protendidas, VPS e VPD, demonstraram um desempenho satisfatório no que diz respeito aos deslocamentos limites definidos pela NBR 6118/2014.

Silva (2019) observou que a laje com vigotas protendidas apresentou valores de carga 110,10 % superiores aos da laje com vigotas treliçadas, com ambas situações atendendo à flecha admissível estabelecida pela NBR 6118. Característico do concreto protendido que apresenta maior rigidez, menor fissuração e menor deslocamento como já apontado por Gilbert, Mickleborough, Ranzi (2017), Marčiukaitis e Juknevičius (2017) e Cholfe e Bonilha (2018).

Analisando o comportamento dos dois arranjos ensaiados no trabalho, observa-se que, para mesmas cargas aplicadas, a laje VPD apresentou deslocamentos inferiores a VPS, embora os sistemas difiram entre si

e não possa ser realizada uma comparação direta. Porém, o percentual de redução dos deslocamentos médios da laje com VPD em comparação com os deslocamentos da laje com VPS, não ultrapassaram 20%. A Figura 6 apresenta o comparativo dos deslocamentos médios dos ensaios realizados.

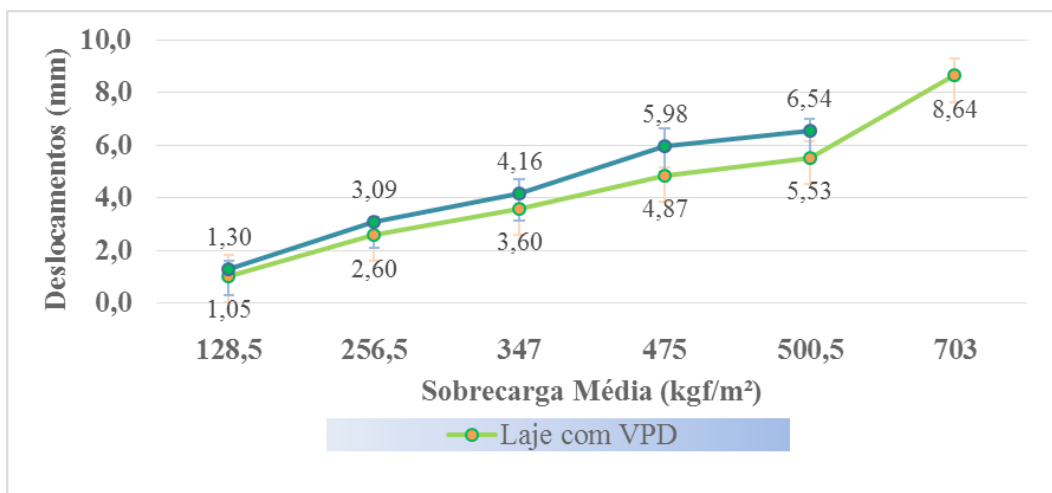
Vale ressaltar que o método de dimensionamento com VPD é, geralmente, utilizado na prática para lajes com grandes vãos ou com sobrecarga elevada, mostrando-se eficiente para estas situações.

Considera-se ainda que o f_{ck} de projeto não foi atingido nos protótipos ensaiados. Deve-se ter um cuidado com o traço do concreto utilizado, a cura do concreto e o controle de qualidade do mesmo utilizado em obras da construção civil.

Conclusões

O presente trabalho teve como objetivo analisar experimentalmente dois sistemas de lajes pré-fabricadas com vigotas protendidas e preenchimento com tavela de EPS, sendo um arranjo com vigota simples (VPS) e um

Figura 6 - Comparação dos deslocamentos das lajes com VPS e VPD



arranjo com vigotas duplas (VPD), usualmente utilizados na construção civil. Após a realização dos ensaios pode-se concluir que:

- a) os deslocamentos aproximados, no centro do vão, para os dois sistemas ensaiados considerando a carga de projeto, apresentaram valores inferiores aos deslocamentos limites ($L/250$) definidos de acordo com a NBR 6118;
- b) para os mesmos carregamentos aplicados nas lajes (VPS e VPD), mesmo os sistemas apresentando uma pequena variação em suas dimensões, o arranjo

estrutural com vigotas protendidas duplas obteve deslocamentos cerca de 20% inferiores ao arranjo estrutural com vigotas protendidas simples;

- c) o sistema de VPD é utilizado para vãos maiores, com sobrecargas mais elevadas e, nesse sentido, o sistema torna-se uma boa opção.

Considera-se que o estudo experimental é válido para sanar dúvidas de projetistas quanto à utilização de arranjos estruturais com vigotas protendidas pré-fabricadas simples e duplas em obras da construção civil.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: **Concreto Armado – Projeto de estruturas de concreto - Procedimento**. Rio de Janeiro, 2014.

BASTOS, P. S. dos S. **Lajes de concreto**. Bauru - SP: Universidade Estadual Paulista, 2015. 115 p.

BEZERRA, A. V. R.; NUNES, A. G. **Estrutura de laje pré-moldada: análise comparativa entre enchimento com eps e bloco cerâmico**. 2020. S/N. TCC (Graduação) - Curso de Curso de Bacharelado em Ciência e Tecnologia, Universidade Federal Rural do Semiárido, Mossoró - RN, 2020.

CATOIA, B.; FERREIRA, M. de A.; PINHEIRO, L. M. Resistência ao cisalhamento de lajes alveolares protendidas. **Cadernos de Engenharia de Estruturas**, v. 16, n. 66, p. 69-84, 2016.

CHOLFE, L.; BONILHA, L. **Concreto protendido: teoria e prática**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2018. 360 p.

CORONETTI, L. **Estudo Numérico e Experimental de Lajes Pré-Moldadas (Vigota-Tabela) da Região de Passo Fundo -RS**. 2003. 62 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2003.

DAHMAN, N. A.; IRHOUMA, A. H.; MOUSA, A. I.; SAADIDEEN, W.K.; ALLAN, M.J. Design optimization and sensitivity analysis of simply supported prestressed concrete girders: a two dimensional non-linear paradigm. **Journal Of King Saud University - Engineering Sciences**, fev. 2021.

FERREIRA, R. M. **Laje nervurada unidirecional com pré-laje treliçada e elemento de enchimento**. 2015. 58 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

GILBERT, R. I.; MICKLEBOROUGH, N. C.; RANZI, G. **Design of Prestressed Concrete to Eurocode 2**. 2. ed. New York: Crc Press, 2017. 665 p.

MARÏUKAITIS, G.; JUKNEVIËIUS, L. Deviation in Deflections of Eccentrically Prestressed Reinforced Concrete Structures. **Procedia Engineering**, v. 172, p. 706-710, 2017.

MORAIS, J. P. G. **Estudo paramétrico de lajes pré-moldadas tipo duplo T em concreto armado**. 2020. 49 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Centro Universitário Christus, Fortaleza, 2020.

OLIVEIRA, M. A. de. **Lajes pré-moldadas nervuradas unidirecionais em concreto armado – análise teórica e experimental de nervuras**. 2015. 79 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de Santa Cruz do Sul, Santa Cruz do Sul, 2015.

PORTO, J. H. **Protensão em lajes lisas: Análise e Dimensionamento**. 2019. 98 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Apucarana-Pr, 2019.

SANABRA-LOEWE, M.; CAPELLÀ-LLOVERA, J. The four ages of early prestressed concrete structures. **PCI Journal**, v. 59, Issue 4, p. 93-121, 2014.

SILVA, L. B. da. **Análise comparativa entre lajes com vigotas treliçadas e protendidas**. 2019. 81 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Pampa. Alegrete, 2019.