

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

LEONARDO BERTA DA SILVA

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE LAJES COM VIGOTAS TRELIÇADAS E
PROTENDIDAS**

**Alegrete
2019**

LEONARDO BERTA DA SILVA

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE LAJES COM VIGOTAS TRELIÇADAS E
PROTENDIDAS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia Civil
da Universidade Federal do Pampa, como
requisito parcial para obtenção do Título de
Bacharel em Engenharia Civil

Orientador: Prof. Dr. Sc. Ederli
Marangon

**Alegrete
2019**

LEONARDO BERTA DA SILVA

ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE LAJES COM VIGOTAS TRELIÇADAS E
PROTENDIDAS

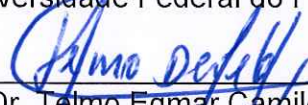
Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia Civil
da Universidade Federal do Pampa, como
requisito parcial para obtenção do Título de
Bacharel em Engenharia Civil

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 25 de novembro
de 2019.

Banca examinadora:



Prof. Dr. Sc. Ederli Marangon
Orientador
Universidade Federal do Pampa



Prof. Dr. Telmo Egmar Camilo Deifeld
Universidade Federal do Pampa



Eng. Civil Pedro Henrique de Omena Jucá
Universidade Federal do Pampa

AGRADECIMENTOS

A Deus, sobre tudo.

A minha família, pelo amor, incentivo e apoio incondicional.

Ao meu orientador, Prof. Ederli Marangon, pelo suporte e incentivo, e aos componentes da banca examinadora.

À empresa Cerâmica Kaspary, pelo fornecimento dos materiais pré-moldados e pelo apoio à realização deste trabalho.

Aos colegas e amigos que auxiliaram na execução dos ensaios experimentais.

Por fim, a todos que direta ou indiretamente fizeram parte de minha formação, o meu muito obrigado.

RESUMO

Lajes pré-moldadas apresentam grandes vantagens construtivas, e a protensão aplicada aos seus elementos componentes acrescenta propriedades estruturais positivas ao sistema. Buscando-se realizar a análise comparativa entre a influência de vigotas protendidas e de vigotas treliçadas sobre o sistema, em termos estruturais, construtivos e de custos, as vantagens e desvantagens das mesmas foram relacionadas, em ensaios experimentais e estudos de custos. Neste trabalho, foram ensaiados experimentalmente 6 protótipos de lajes pré-moldadas com 2,1 m de comprimento, sendo 3 lajes com vigotas protendidas e 3 lajes com vigotas treliçadas. Os ensaios constituíram-se na aplicação de uma carga na seção central dos protótipos biapoiados, configurando o sistema de flexão a 3 pontos, onde foram realizadas as leituras de cargas e flechas. Também foi avaliada a resistência à compressão do concreto da capa, aos 28 dias de idade, onde obtiveram-se resultados com valor médio de f_{ck} igual a 24,25 MPa, atendendo às exigências da NBR 14859-1, para lajes pré-fabricadas. Nos ensaios de flexão dos protótipos observou-se que, por conta da compressão prévia do concreto das vigotas protendidas, as lajes com estes elementos apresentaram melhores resultados em termos estruturais. Na carga de primeira fissura, as lajes com vigotas protendidas resultaram valores de carregamento 110,1% superiores aos das lajes com vigotas treliçadas; em relação à flecha limite estabelecida pela NBR 6118, os valores foram 37,7% superiores; e como carregamento máximo suportado, 14,0% superiores. Quanto ao estudo de custos, os insumos diretos das lajes com elementos protendidos se mostraram mais baratos que os das lajes com elementos treliçados, resultando em um valor 29,0% inferior por metro quadrado de laje. A redução dos custos também é evidente nas composições de serviços referentes a lajes com vigotas protendidas, devido ao menor cimbramento necessário. Considera-se, por fim, a utilização de vigotas protendidas como sendo vantajosa em relação às vigotas treliçadas, em termos, estruturais, de custos e construtivos.

Palavras-chave: Lajes pré-fabricadas. Vigotas protendidas. Vigotas treliçadas.

ABSTRACT

Precast slabs present great constructive advantages and the prestress applied to its elements increases the positive structural properties to the system. Seeking a comparative analysis of the influence between prestressed and trussed joists in the system through structural, constructive, and financial terms, the advantages and disadvantages from both were related through experimental trials and cost studies. In this study, 6 prototypes of precast slabs were tested, with the length of 2,1 m being 3 slabs with prestressed joists and 3 with trussed joists. The experiments consisted in the application of a load distributed over the transverse section of the simply supported specimens, thus configuring a 3 point flexural test, where the loads and deflections were measured. It was also assessed the compressive strength of the concrete of the cover at 28 days of age, where the results achieved the average f_{ck} value of 24,25 MPa, therefore reaching the requirements of the NBR 14859-1, for precast slabs. During the flexural experiments of the specimens it was noticed that due to the precompression of the concrete from the prestressed joists, the slabs containing those elements yielded better results in structural terms. At the first cracking strength the slabs with prestressed joists resulted strength values 110,1% higher than those of the slabs with trussed joists; in relation to the deflection limit established by the NBR 6118, the results were 37,7% superior; and about the maximum supported strength the results were 14% superior. Regarding the cost studies, the direct inputs of the slabs with prestressed elements presented themselves cheaper than the ones with trussed elements, resulting in a 29,0% inferior value per square meter of slab. The cost reduction is also evident in the service compositions referring slabs with prestressed joists, due to the less falsework needed. Finally, it can be considered that the use of prestressed joists as being more advantageous than trussed joists through structural, financial and constructive terms.

Keywords: Precast slabs. Prestressed joists. Trussed joists.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Tensões normais em elemento protendido no estado em vazio.....	18
Figura 2 -	Tensões normais em elemento protendido no estado em serviço, com protensão total.....	18
Figura 3 -	Tensões normais em elemento protendido no estado em serviço, com protensão parcial.....	18
Figura 4 -	Esquema típico de protensão de elementos pré-fabricados.....	20
Figura 5 -	Modelo de ensaio – Nakao <i>et. al.</i> (2005).....	24
Figura 6 -	Modelo de seção - Merlin <i>et. al.</i> (2005).....	25
Figura 7 -	Ensaio de flexão - Merlin <i>et. al.</i> (2005).....	25
Figura 8 -	Diagrama de deslocamento x força – Merlin <i>et. al.</i> (2005).....	26
Figura 9 -	Execução dos protótipos - Barbieri (2016).....	27
Figura 10 -	Equipamento e protótipo posicionado - Barbieri (2016).....	28
Figura 11 -	Gráfico de momentos de ruptura - Barbieri (2016).....	28
Figura 12 -	Corpo de prova - Menegon e Vargas (2018).....	29
Figura 13 -	Diagrama de carga x flecha Grupo A - Menegon e Vargas (2018)..	30
Figura 14 -	Diagrama de carga x flecha Grupo B - Menegon e Vargas (2018)..	31
Figura 15 -	Seções transversais das vigotas de Pisoni e Vargas (2016).....	32
Figura 16 -	Diagrama de carga x deslocamento - Pisoni e Vargas (2016).....	33
Figura 17 -	Cargas no momento de ruptura - Pisoni e Vargas (2016).....	33
Figura 18 -	Diagrama de carga x deslocamento - 3,00m de vão - Grando e Vargas (2018).....	34
Figura 19 -	Diagrama de carga x deslocamento - 1,80m de vão - Grando e Vargas (2018).....	35
Figura 20 -	Diagrama de carga x flecha com 2,04m - Diniz e Vargas (2016)..	36
Figura 21 -	Diagrama de carga x flecha com 2,44m - Diniz e Vargas (2016)..	37
Figura 22 -	Diagrama de carga x flecha com 2,84m - Diniz e Vargas (2016)..	37
Figura 23 -	Esquema da seção das Lajes Protendidas.....	43
Figura 24 -	Esquema da seção das Lajes Trelaçadas.....	43
Figura 25 -	Posicionamento do reforço na região dos apoios.....	46
Figura 26 -	Pré-laje e armadura de distribuição disposta nas fôrmas.....	49
Figura 27 -	Concretagem das lajes com ganchos.....	50

Figura 28	Diagramas de esforço cortante e momento fletor causados pelo carregamento na flexão.....	51
Figura 29	Esquema do posicionamento dos <i>LVDTs</i> nas lajes.....	51
Figura 30	Posicionamento de um protótipo na prensa.....	53
Figura 31	Esquema de montagem dos ensaios.....	54
Figura 32	Laje pronta para ensaio, com instrumentação posicionada.....	54
Figura 33	Diagrama de Carga X Flecha das lajes com vigotas protendidas....	59
Figura 34	Diagrama de Carga X Flecha das lajes com vigotas treliçadas.....	59
Figura 35	Comparação dos diagramas de Carga X Flecha.....	60
Figura 36	Comparação de diagramas – com cargas de plastificação.....	62
Figura 37	Comparação de diagramas – com flecha limite normativa.....	63
Figura 38	Áreas sob os diagramas do gráfico de comparação entre as lajes..	65
Figura 39	Fissuras destacadas em exemplar de laje com vigotas protendidas	66
Figura 40	Fissuras destacadas em exemplar de laje com vigotas treliçadas....	66
Figura 41	Situação de tensões normais em laje com vigotas protendidas.....	67
Figura 42	Situação de tensões normais em laje com vigotas treliçadas.....	67
Figura 43	Fissuração durante um ensaio de lajes com vigotas protendidas...	69
Figura 44	Gráfico comparativo entre coeficientes dos serviços.....	70
Figura 45	Comparação entre média de custos.....	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Comparação das vantagens dos tipos de vigotas.....	22
Tabela 2 -	Comparativos entre treliças de Albuquerque <i>et. al.</i> (2005).....	23
Tabela 3 -	Altura das lajes de acordo com o elemento de enchimento.....	42
Tabela 4 -	Intereixos mínimos padronizados.....	42
Tabela 5 -	Composição de materiais do concreto da capa.....	44
Tabela 6 -	Parâmetros dos protótipos.....	46
Tabela 7	Composição de serviços para laje protendida.....	56
Tabela 8	Composição de serviços para laje treliçada.....	56
Tabela 9	Valores relevantes analisados das lajes com vigotas protendidas..	61
Tabela 10	Valores relevantes analisados das lajes com vigotas treliçadas....	61
Tabela 11	Comparação de coeficientes das composições.....	69
Tabela 12	Proporções em que os serviços das lajes treliçadas são mais caros que os de lajes protendidas.....	70
Tabela 13	Resultado da pesquisa de custos no mercado regional.....	71

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
1.1	Objetivos.....	16
1.1.1	Objetivo geral.....	16
1.1.2	Objetivos específicos.....	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	17
2.1	Vigotas protendidas.....	17
2.2	Vigotas treliçadas.....	21
2.3	Lajes com vigotas pré-fabricadas.....	22
2.4	Trabalhos com análises experimentais.....	23
2.4.1	Trabalho de Nakao <i>et. al.</i> (2005).....	23
2.4.2	Trabalho de Merlin <i>et.al.</i> (2005).....	24
2.4.3	Trabalho de Barbieri (2016).....	26
2.4.4	Trabalho de Menegon e Vargas (2018).....	29
2.4.5	Trabalho de Pisoni e Vargas (2016).....	31
2.4.6	Trabalho de Grando e Vargas (2018).....	34
2.4.7	Trabalho de Diniz e Vargas (2016).....	36
2.5	Análise da revisão de trabalhos experimentais.....	38
3	METODOLOGIA.....	40
3.1	Materiais.....	40
3.1.1	Vigotas protendidas.....	40
3.1.2	Vigotas treliçadas.....	41
3.1.3	Blocos de enchimento (tabelas).....	41
3.1.4	Armadura de distribuição.....	43
3.1.5	Concreto da capa.....	44
3.2	Considerações iniciais.....	45
3.3	Programa experimental.....	47
3.3.1	Execução das lajes.....	48
3.3.1.1	Montagem das fôrmas.....	48
3.3.1.2	Distribuição da pré-laje.....	48
3.3.1.3	Concretagem da capa.....	49
3.3.1.4	Cura.....	50

3.3.2	Ensaio.....	50
3.3.2.1	Instrumentação, equipamentos e aparelhagem.....	51
3.3.2.2	Montagem dos ensaios.....	52
3.3.2.3	Execução dos ensaios.....	54
3.4	Estudo de custos.....	55
4	RESULTADOS E ANÁLISES.....	58
4.1	Quanto ao procedimento experimental.....	58
4.1.1	Caracterização do concreto da capa.....	58
4.1.2	Ensaio de flexão sobre os protótipos de lajes.....	58
4.1.2.1	Carga limite do fim do regime elástico.....	61
4.1.2.2	Carregamento resistido na situação de Flecha Limite.....	63
4.1.2.3	Carregamento máximo resistido.....	64
4.1.2.4	Análise visual de fissuração.....	66
4.2	Quanto ao estudo de custos.....	69
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	73
5.1	Recomendações para trabalhos futuros.....	74
	REFERÊNCIAS.....	75

1 INTRODUÇÃO

Com a constante evolução da construção civil, deu-se a necessidade de aprimoramento dos processos construtivos, com construções duráveis, econômicas e estruturalmente seguras. Para tal necessidade, a industrialização de parte dos processos surge, entre outras soluções, como resposta a estes e outros diversos quesitos, e traz como alternativa o concreto armado pré-moldado.

Quando se trata de lajes, a construção civil caminhou e caminha, principalmente, para a redução do peso próprio das mesmas, tendo em vista a grande parcela que este representa no carregamento da estrutura, e a dificuldade da correta execução de fôrmas e cimbramento deste elemento estrutural.

Segundo Carvalho e Figueiredo Filho (2004) passou-se a utilizar, nas edificações de pequeno e médio porte, nervuras pré-moldadas compostas geralmente por trilhos ou treliças, em lajes nervuradas. Com estas, pode-se eliminar parte do concreto da região tracionada da seção e o substituir por um material de enchimento leve e inerte.

A utilização de elementos pré-moldados como nervuras elimina a execução de fôrmas e reduz consideravelmente o número de escoras necessárias na execução da laje, o que resulta em uma redução no custo e aumento da produtividade, uma grande vantagem, tendo-se em vista a criticidade que a fase de escoramentos representa em uma obra.

Dentre os tipos de nervuras pré-moldadas, ou vigotas, destacam-se a vigota treliçada (VT) e a vigota de concreto armado protendido, ou vigota protendida (VP). Cada um dos tipos de vigotas apresenta seus benefícios ao projeto estrutural. As lajes com vigotas treliçadas têm como vantagem a melhor monoliticidade do sistema, bem como a possibilidade de execução de nervuras transversais e de torná-la bidirecional. Já as vigotas protendidas proporcionam ao sistema um melhor combate às deformações, o que se torna um importante critério, tendo-se em vista o problema que as flechas de lajes pré-moldadas representam em um projeto.

Por ser utilizado principalmente em edificações de pequeno e médio porte, nota-se uma carência de conhecimento científico sobre o sistema. As proporções dos benefícios de cada tipo de vigota, e até que ponto cada uma se mostra vantajosa sobre a outra devem ser analisados e compreendidos, tendo-se em vista que a escolha indevida pode resultar em um desempenho insatisfatório do sistema, além de custo desnecessário. A comparação experimental direta entre lajes com cada tipo de

vigota pode apresentar resultados que destaquem as vantagens relativas entre elas, como o atendimento aos estados limites de serviço e último, que quando comparados aos custos relativos, podem se tornar vantajosos ou não.

1.1 Objetivos

Os objetivos deste trabalho são, de forma geral e de forma específica, conforme descritos em 1.1.1 e 1.1.2, respectivamente.

1.1.1 Objetivo geral

Realizar experimentalmente a análise comparativa entre lajes nervuradas com vigotas pré-moldadas treliçadas e de concreto armado protendido, de modo a determinar algumas das suas vantagens e desvantagens, em termos estruturais, de custos e construtivos.

1.1.2 Objetivos específicos

- Realizar ensaios mecânicos de flexão em protótipos de lajes com nervuras pré-moldadas com os dois diferentes tipos de vigotas, verificando valores de resistência e deformações;
- Realizar, por meio do Sistema Nacional de Preços e Índices para a Construção Civil (SINAPI), uma análise de custos sobre lajes com vigotas protendidas e treliçadas;
- Analisar os resultados obtidos dos ensaios de forma a avaliar a viabilidade de utilização de cada tipo de vigota pré-moldada, conforme requisitos de projeto, relacionando-as aos seus custos relativos;

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são apresentados conceitos e definições acerca de vigotas treliçadas e protendidas, segundo autores e normas relacionados à lajes pré-moldadas.

Também são descritos trabalhos com ensaios experimentais que influenciam nos campos de avaliação da pesquisa, além de análises simplificadas e comparativas entre as conclusões dos autores abordados.

2.1 Vigotas protendidas

Segundo Veríssimo e César Jr (1998), protender uma peça de concreto consiste em introduzir esforços prévios na mesma, de forma que anulem ou reduzam as tensões de tração provocadas pelas solicitações em serviço. Ainda segundo os autores, a protensão com aderência inicial é largamente empregada na produção de elementos pré-fabricados, em pistas de protensão.

Entre os benefícios da utilização da protensão em pré-moldados, associada a concretos de alta resistência, Veríssimo e César Jr (1998) apontam que, em peças fletidas, a protensão permite que toda a seção trabalhe sob compressão. Isto resulta em um aumento da tensão resistida pela peça até o momento de abertura de fissuras, o que proporciona um maior regime elástico no diagrama de Tensão X Deformação, de peças protendidas

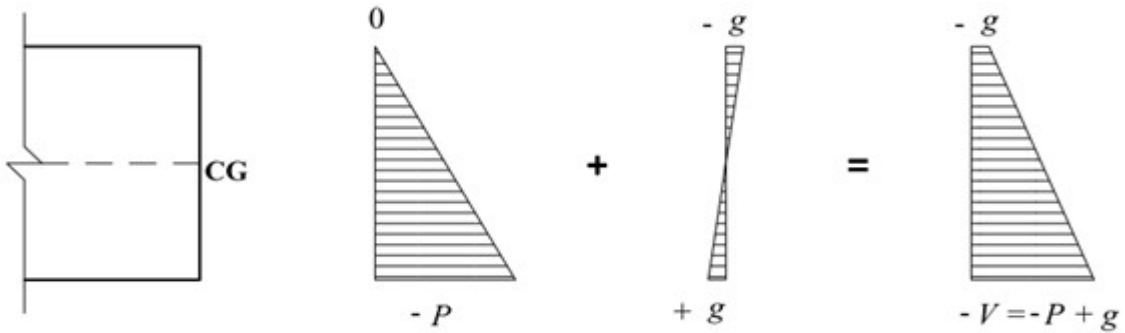
Para que se exemplifique melhor os efeitos da protensão, pode-se apresentar, nas Figuras 1, 2 e 3, uma generalização dos exemplos analíticos apresentados por Veríssimo e César Jr (1998) em uma seção de elemento de concreto armado. Na Figura 1, tem-se as tensões normais resultantes na situação nomeada de estado em vazio (sem aplicação do carregamento externo, somente com o peso próprio e a protensão atuando). Nas Figuras 2 e 3, tem-se as tensões normais com a interferência do carregamento externo de serviço a flexionar o elemento, situação nomeada, em bibliografias consultadas, como estado em serviço.

Nas Figuras 1, 2 e 3, deve-se considerar que:

- CG = Centro geométrico da seção transversal do elemento;
- P = Tensão de compressão do concreto gerada pela pré-tração das armaduras (protensão do elemento);
- g = tensão gerada pelo peso próprio do elemento;
- V = somatório de tensões no estado em vazio, na parte inferior da seção;

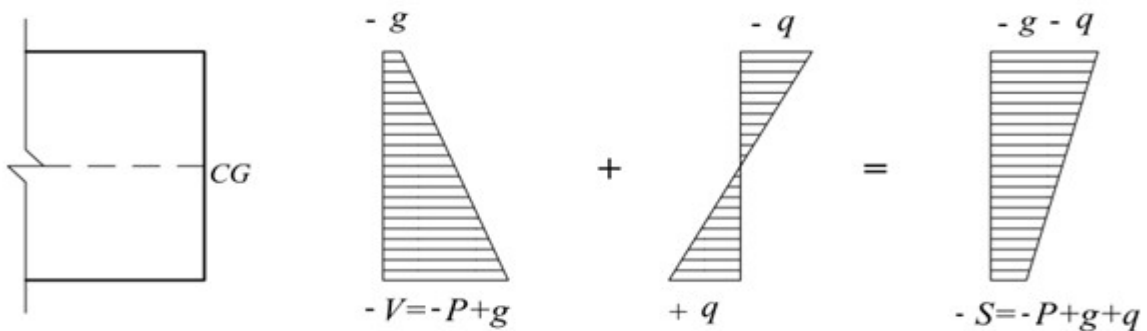
- q = tensão gerada pela flexão imposta ao elemento, devido ao carregamento externo;
- S = somatório de tensões no estado em serviço, na parte inferior da seção.

Figura 1 – Tensões normais em elemento protendido no estado em vazio



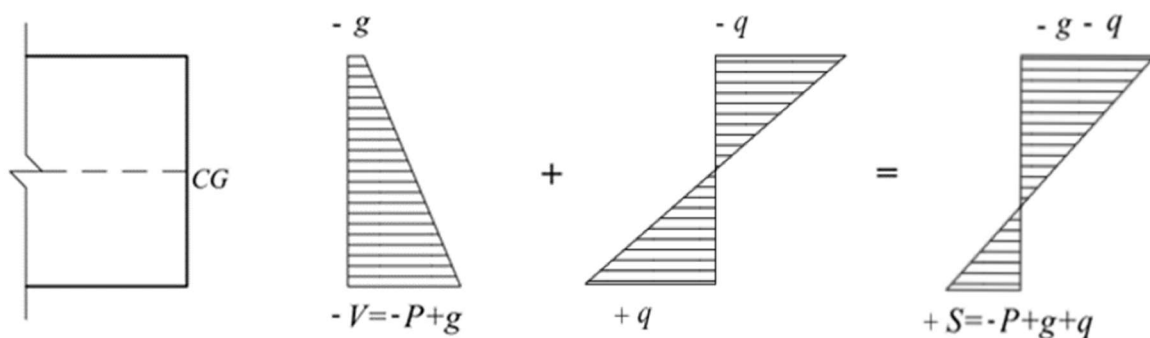
Fonte: Adaptado de Veríssimo e César Jr. (1998)

Figura 2 – Tensões normais em elemento protendido no estado em serviço, com protensão total



Fonte: Adaptado de Veríssimo e César Jr. (1998)

Figura 3 – Tensões normais em elemento protendido no estado em serviço, com protensão parcial



Fonte: Adaptado de Veríssimo e César Jr. (1998)

Da Figura 1, a leitura é de que a protensão gera um efeito de compressão no concreto, com uma tensão genérica P . Com o peso próprio do elemento (g), tem-se uma compressão na face superior também, e uma pequena diminuição da tensão de protensão.

Com a aplicação do carregamento, as tensões de flexão do elemento (q) atuam sobre o mesmo e, quando somadas com o estado de tensões em vazio, resultam em uma configuração final ainda com compressão em toda a seção. Este processo é o observado na Figura 2, e o tipo de protensão é nomeado como protensão total ou completa, sem tensões de tração na seção, conforme Veríssimo e César Jr (1998).

Na Figura 3, tem-se o processo semelhante à Figura 2, porém com tensões de tração resultantes em parte da seção. Esta situação se caracteriza como resultado de uma protensão parcial, que segundo Veríssimo e César Jr (1998), é o tipo de protensão em que se resultam pontos da seção com tensões de tração, após o carregamento.

Os aços para armaduras ativas (com protensão) caracterizam-se pela sua elevada resistência e pela ausência de patamar de escoamento. Além disso, especificamente os aços com baixa relaxação, que recebem um tratamento termomecânico específico, possuem uma melhora nas características elásticas. (HANAI, 2005)

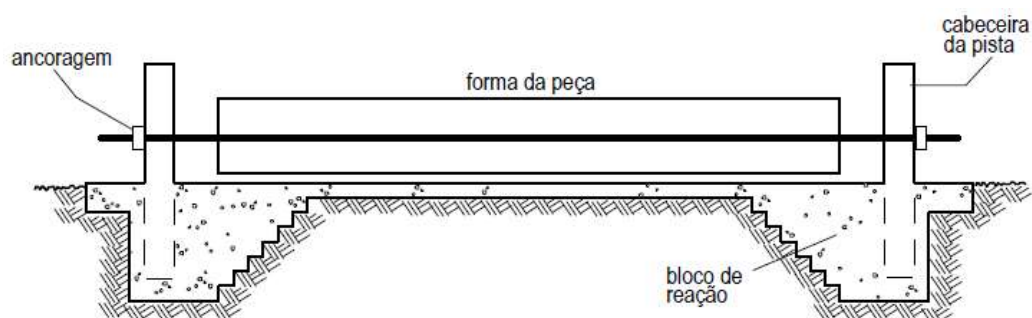
Quanto às regulamentações das características e propriedades dos aços para protensão, tem-se a NBR 7482 (ABNT, 2008) – “Fios e barras para concreto protendido”, e a NBR 7483 (ABNT, 2008) – “Cordoalhas de aço para concreto protendido”, possuindo variações conforme as formas (fios, cordoalhas ou barras) e pelas modalidades de tratamento (com relaxação normal ou baixa). Segundo Veríssimo e César Jr (1998), no Brasil, em sistemas de pré-tração, os fios são mais utilizados.

A designação da nomenclatura para os fios de aço protendido, segundo a NBR 7482 (ABNT, 2008), se inicia pela sigla CP, seguida da resistência característica de ruptura do aço (em kN/cm^2), da sigla denominadora sobre o tipo de relaxação (RN para relaxação normal e RB para relaxação baixa) e finalizada pela letra determinante do tipo de acabamento do fio (L para fio liso e E para fio com entalhe).

Estes fios para protensão, segundo Veríssimo e César Jr. (1998), no sistema de protensão para elementos pré-moldados, são posicionados em pistas, ancorados em blocos nas cabeceiras e em seguida tracionados. Após a pré-tração do aço,

segundo os autores, o concreto é lançado e adensado, e após a cura, as fôrmas são retiradas e os fios tracionados são cortados, transferindo a força de protensão para o concreto por aderência. Na Figura 4 pode-se observar o sistema de protensão de elementos pré-fabricados, apresentado por Veríssimo e César Jr. (1998).

Figura 4 - Esquema típico de protensão de elementos pré-fabricados



Fonte: Veríssimo e César Jr. (1998)

Pela definição da NBR 14859-1 (ABNT, 2016), vigotas de concreto protendido possuem seção de concreto usualmente formando um “T” invertido, com armadura ativa pré-tensionada, totalmente englobada pelo concreto da viga. Lajes com vigotas de concreto protendido são também classificadas como lajes de concreto protendido (LP).

As vantagens obtidas com o uso de vigotas de concreto armado protendido em lajes, segundo Merlin (2002), são:

- Proporcionam redução do cimbramento, visto que o concreto da seção da vigota já possui capacidade de suportar uma parcela da carga da laje;
- Apresentam melhor desempenho em relação à verificação ao estado limite de deformações excessivas.

Quanto às desvantagens, Droppa Júnior (1999) aponta:

- Não apresenta um bom comportamento monolítico com a estrutura;
- Podem se tornar elementos relativamente pesados, dependendo do vão a ser vencido pela laje;
- Não permitem a execução de nervuras transversais e de um sistema de laje bi apoiado.

Por conta da seção contínua de concreto das vigotas, as lajes que empregam vigotas pré-fabricadas de concreto armado comum ou de concreto armado protendido

não permitem a execução de nervuras transversais, o que impede o emprego deste tipo de elemento em uma laje bidirecional, se tornando uma grande desvantagem.

Cabe-se ainda destacar o trabalho de Zimmermann (2018), que realizou uma análise técnico-financeira do uso de vigotas protendidas ao invés de vigotas de concreto armado comuns, por meio de um estudo de caso. Zimmermann (2018), ao final de seu trabalho obteve como resultado uma economia agregada de 20,81% sobre o custo total da obra quando utilizou vigotas protendidas.

2.2 Vigotas treliçadas

Pela definição da NBR 14859-1 (ABNT, 2016), vigotas treliçadas têm seção de concreto formando uma placa, com armadura treliçada parcialmente envolvida pelo concreto da vigota.

Lajes com vigotas treliçadas são comumente chamadas de lajes treliçadas.

A armação da laje treliçada, como a própria denominação sugere, é formada por uma treliça, constituída por duas barras de aço paralelas na base, denominadas de banzos inferiores, e uma barra de aço no topo, denominada banzo superior, interligadas por duas barras de aço diagonais, denominadas de sinusóides (ou diagonais), com espaçamento regular (FERREIRA, 2017).

As alturas padronizadas das treliças são apresentadas na NBR 14859-3 (ABNT, 2016), assim como o código de classificação da treliça. O código é composto por uma sequência de números após a sigla TR, sendo, em ordem: altura da treliça (H); bitola do banzo superior (BS); bitola das diagonais (D); bitola do banzo inferior (BI). Por exemplo, uma treliça com 12 cm de altura, banzo superior com barra de bitola igual a 6 mm, diagonais de 4,2 mm e banzos inferiores com barras de 5 mm, possui a nomenclatura de TR 12645.

Segundo Droppa Júnior (1999), por conta da grande solidarização da armadura da treliça com o concreto moldado no local, as lajes treliçadas podem ser tratadas como estruturas monolíticas, afirmando ainda que, a princípio, este tipo de laje tem o mesmo funcionamento estrutural de uma laje projetada da forma convencional (maciça). Isto constitui uma das principais vantagens da laje treliçada: a sua monoliticidade.

As lajes com vigotas treliçadas apresentam, além da grande monoliticidade do sistema, como principais vantagens, segundo Droppa Júnior (1999):

- Facilidade de moldagem e transporte, pois possui baixo peso próprio;

- Redução relativa do custo da obra, com a redução de escoramentos, mão-de-obra e materiais;
- Dimensionamento uni ou bidirecional, com o emprego de nervuras transversais;
- Eliminação de trincas e fissuras, por conta das diagonais com total aderência ao concreto complementar, combatendo também o esforço de cisalhamento;

A laje treliçada apresenta também desvantagens quando comparada com os pavimentos tradicionais, como as lajes maciças de concreto. Segundo Droppa Júnior (1999), deve-se tomar cuidado especial com a verificação para o estado limite de deformações excessivas, visto que a laje é formada por elementos muito esbeltos, na grande maioria dos casos.

Na Tabela 1 pode-se observar, de maneira resumida, a listagem comparativa de algumas das vantagens e desvantagens citadas, apresentadas pelos dois tipos de vigotas analisados, sendo a vantagem de uma sobre a outra maior ou menor.

Tabela 1 – Comparação das vantagens dos tipos de vigotas

Vantagens	Vigota Treliçada	Vigota Protendida
Solidarização da seção	Maior	Menor
Monoliticidade da estrutura	Maior	Menor
Combate às deformações	Menor	Maior
Facilidade de manuseio	Maior	Menor
Redução de escoramento	Menor	Maior
Nervuras transversais	Maior	Menor
Utilização bidirecional	Maior	Menor

Fonte: Elaboração própria

2.3 Lajes com vigotas pré-fabricadas

Dentre os autores a produzirem estudos sobre estas lajes no Brasil, pode-se citar o trabalho de Bocchi Júnior (1995), que estudou lajes nervuradas de concreto pré-fabricadas, comparando-as, através de exemplo numérico, às lajes nervuradas moldadas *in loco*. O autor ainda analisou as principais recomendações da norma de concreto armado vigente na época, a NBR 6118:1980, apresentando exemplos do detalhamento das armaduras de flexão.

Posteriormente, Albuquerque *et al.*, (2005) abordam a vigota pré-fabricada com armadura treliçada protendida (pré-tração). Os autores apresentaram o processo

construtivo e alguns exemplos de protensão em vigotas treliçadas, que surgem como uma alternativa e vantagem sobre as vigotas tradicionais de concreto armado. Além de facilidades construtivas, os autores verificaram a viabilidade econômica para lajes treliçadas protendidas.

Após estabelecerem custos por unidades de massa para o aço de protensão e o aço comum, Albuquerque *et al.*, (2005) realizaram o cálculo das treliças com o auxílio de softwares, onde variaram os valores de carregamentos e de vãos, apontando a treliça necessária para resistir a cada caso. Com as diferentes quantidades de aço das treliças, os autores realizaram a comparação direta entre os custos das mesmas, com e sem pré-tração.

Como resultado, os autores apresentam a opção mais econômica para cada treliça e vãos analisados. Alguns dos resultados apresentados pelos autores podem ser observados simplificados na Tabela 2, considerando todos os exemplos da mesma com a treliça TR08644 e com altura total de 12 centímetros, As vigotas treliçadas sem protensão são nomeadas como CA e as protendidas como CP.

Tabela 2 – Comparativos entre treliças de Albuquerque *et al.* (2005)

Vão (m)	q (kg/m ²)	Opção mais econômica
3	300	CA
4	300	CP
3	200	CA
4	200	CP

Fonte: Adaptado de Albuquerque *et al.*, (2005)

Os resultados para maiores vãos, com variações das cargas distribuídas aplicadas, obtidos por Albuquerque *et al.* (2005) resultaram na opção mais econômica como sendo a treliça com protensão.

2.4 Trabalhos com análises experimentais

2.4.1 Trabalho de Nakao *et al.* (2005)

O trabalho com ensaios experimentais de Nakao *et al.* (2005), “Lajes Pré-fabricadas treliçadas: uma análise experimental regional segundo a NBR 14859”, se desenvolveu em três fases, sendo a primeira a análise dos elementos de enchimento, a segunda a análise de um segmento de laje sem a capa de concreto, e por fim, a análise de um segmento de laje completo, com a capa de concreto, ensaiado com a

idade de três dias após a concretagem. Os ensaios visaram a caracterização geométrica e a verificação da resistência dos elementos, de acordo com a NBR 14859:2002, vigente na época.

Nakao *et al.* (2005) utilizaram blocos cerâmicos com altura de 7 cm e espessura da capa de concreto (com resistência característica de 25 MPa) de 5 cm, totalizando a laje com 12 cm de altura. O vão entre os apoios no ensaio foi de 1,30 metros. Como armadura de distribuição, foi utilizada uma tela soldada de malha 20 cm x 20 cm de barras de 3,4 mm de diâmetro. Constituindo a montagem do elemento, foram dispostas três vigotas e entre elas dois blocos de enchimento, totalizando um corpo de prova com dimensões de 1,00 m de largura x 1,50 m de comprimento. Como método de ensaio, Nakao *et al.* (2005) optaram por uma carga aplicada no meio do vão, distribuída pela largura do segmento de laje, conforme apresentado na Figura 5, com a laje já posicionada sob o equipamento.

Figura 5 – Modelo de ensaio - Nakao *et al.* (2005)



Fonte: Nakao *et al.* (2005)

Como resultado da sua pesquisa, Nakao *et al.* (2005) obtiveram uma carga de ruptura, para o modelo de laje completo, com a capa de concreto, de aproximadamente 30 kN. Os autores colocam que a carga de projeto, calculada nos limites dos domínios 3 e 4, considerando uma distribuição uniforme entre as três vigotas, era de aproximadamente 15kN, ou seja, 50% do valor atingido no ensaio,

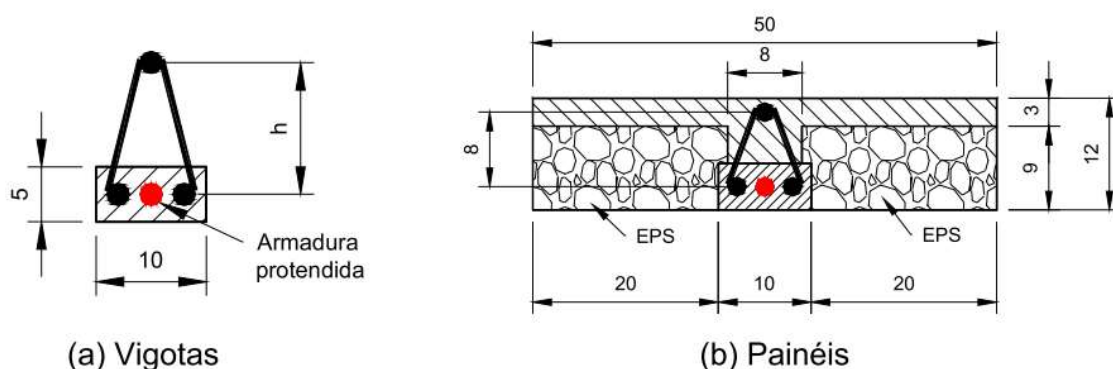
2.4.2 Trabalho de Merlin *et al.* (2005)

Outro trabalho analisado é o de Merlin *et al.*, (2005), “Análise do Efeito da Protensão em Lajes Pré-moldadas com Armação Trelaçada”. Esta pesquisa teve como

intuito a verificação do efeito da aplicação de protensão em faixas de lajes com armadura treliçada.

Merlin *et al.* (2005) realizaram o modelo experimental com a configuração de vigotas e elementos de enchimento conforme a figura 6.

Figura 6 – Modelo de seção - Merlin *et al.* (2005)



Fonte: Merlin *et al.* (2005)

Com a largura total do elemento sendo de 50 cm, Merlin *et al.* (2005) adotaram a distância entre apoios de 430 cm. As cargas foram aplicadas em dois pontos centrais, distantes 140 cm entre si, por meio de atuadores hidráulicos, conforme a Figura 7.

Figura 7 – Ensaio de flexão - Merlin *et al.* (2005)



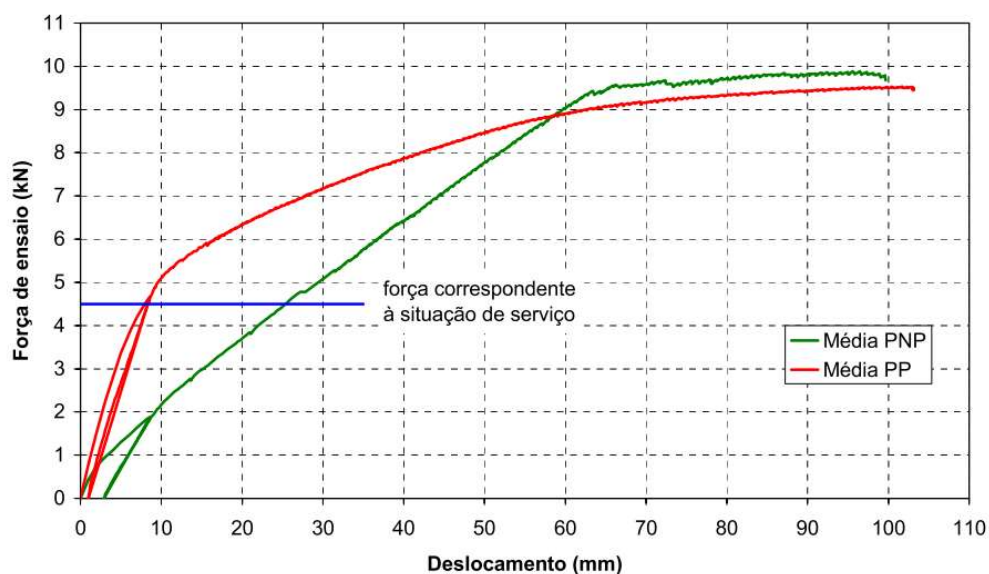
Fonte: Merlin *et al.* (2005)

O procedimento adotado por Merlin *et al.* (2005) se inicia pelo carregamento até a flecha limite de $l/500$, sendo efetuado o registro da carga correspondente. Após

isso, o elemento foi descarregado e foi registrada a flecha residual. Posteriormente, foi efetuado o carregamento até a ruína.

Considerando o peso próprio do painel e o peso do equipamento de ensaio, os autores apresentam o gráfico de deslocamento x força de ensaio, observado na Figura 8, sendo a média dos painéis não protendidos representados pela curva PNP e a média dos painéis protendidos representados pela curva PP.

Figura 8 – Diagrama de Deslocamento x Força - de Merlin *et al.* (2005)



Fonte: Merlin *et al.* (2005)

A força média para a obtenção da flecha limite no trabalho de Merlin *et al.* (2005) foi de 1,88 KN e 4,67 KN, respectivamente, para os painéis sem e com armadura protendida, resultando em uma diferença de 148%. A diferença diminui conforme os elementos se aproximaram da ruína.

Merlin *et al.* (2005) apontam que o maior benefício da armadura protendida esteve na região de serviço, concluindo ainda, que a aplicação de protensão nas vigotas treliçadas resultou em uma redução da flecha média dos painéis para 1/3 da flecha média que resultam os mesmos painéis sem armadura de protensão.

2.4.3 Trabalho de Barbieri (2016)

Barbieri (2016) realizou o trabalho “Análise teórica e experimental de lajes treliçadas”, onde efetuou ensaios com quatro protótipos de lajes com as mesmas características, comparando os resultados obtidos experimentalmente com os obtidos em um modelo teórico.

A autora montou os protótipos considerando estes como uma nervura da laje, sendo compostos por uma vigota no centro, e metade de um bloco de enchimento de EPS para cada lado, totalizando a largura de 41,5 cm. O comprimento dos elementos foi de 2,00 m (vão teórico de 1,93m), e a sua espessura foi de 12 cm, sendo 4 cm de capa de concreto sobre o topo das treliças das vigotas. Na Figura 9 pode-se observar o processo de concretagem de quatro dos protótipos da autora, lado a lado, sem armaduras de distribuição e com pequenas barras de aço entre as tabelas, para evitar a movimentação das mesmas.

Figura 9 – Execução dos protótipos - Barbieri (2016)



Fonte: Barbieri (2016)

O modelo de ensaio utilizado por Barbieri (2016) é constituído por um perfil metálico utilizado como reação, onde a laje é biapoiada sobre dois roletes metálicos distanciados 193 cm entre si. A carga foi aplicada em dois pontos diferentes, centralizados no comprimento da laje, distribuídos transversalmente e distanciados 40 cm entre si. A instrumentação do trabalho pode ser observada na Figura 10.

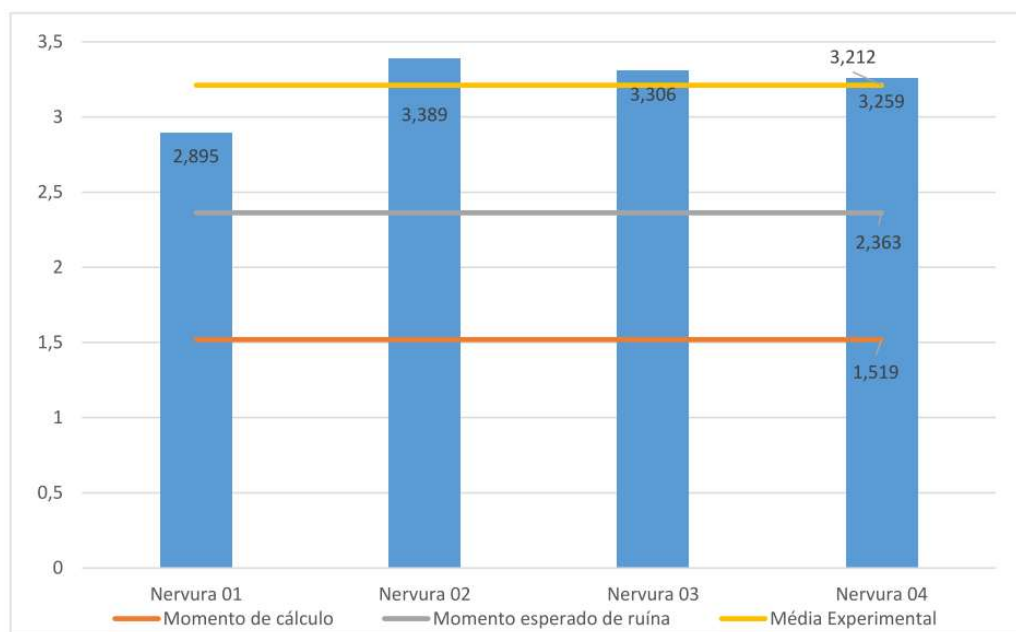
Figura 10 – Equipamento e protótipo posicionado - Barbieri (2016)



Fonte: Barbieri (2016)

Como resultado, para as 4 nervuras ensaiadas, Barbieri (2016) obteve a carga de ruína de aproximadamente 8 kN e apresentou, entre outros diagramas, um gráfico dos momentos de ruptura, com indicações do momento de cálculo, momento esperado de ruptura e da média experimental entre as nervuras ensaiadas, que pode ser observado na Figura 11.

Figura 11 –Gráfico de momentos de ruptura (kN.m) - Barbieri (2016)



Fonte: Barbieri (2016)

Barbieri (2016) conclui posteriormente, após comparar os resultados experimentais com o do modelo teórico realizado no trabalho, que os valores dos

momentos experimentais foram de 114,5% a 123,11% superiores ao momento de cálculo. Portanto, afirma que os parâmetros especificados pela norma brasileira são bastante conservadores e atuam em favor da segurança da estrutura.

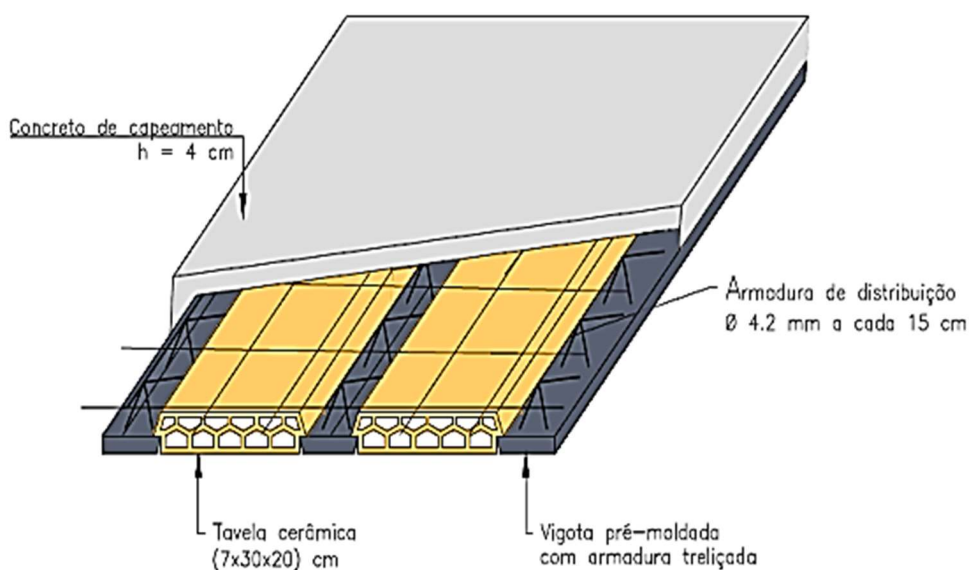
2.4.4 Trabalho de Menegon e Vargas (2018)

Em outro trabalho com análises experimentais, de Menegon e Vargas (2018), foram avaliadas experimentalmente lajes com vigotas treliçadas e lajes com vigotas comuns, de modo a compará-las no que tange à resistência, deformações, carregamento no deslocamento limite e o carregamento de ruptura de cada tipo.

Para a realização dos ensaios, Menegon e Vargas (2018) moldaram doze lajes pré-fabricadas unidirecionais, divididas em dois grupos, sendo um deles com o comprimento de 190 cm e o outro de 310 cm (vãos teóricos de 180 cm e 300 cm). A altura das lajes foi mantida constante, sendo esta de 12 cm (4 cm de capa). O conjunto composto por 3 vigotas e duas tabelas cerâmicas totalizou 98 cm de largura.

Nos protótipos de Menegon e Vargas (2018), as vigotas treliçadas utilizadas foram fabricadas com a treliça TR08644 e a armadura de distribuição foi composta por uma malha, com barras de 4,2 mm de diâmetro a cada 15 cm. Na Figura 12 pode-se observar o esquema da laje a ser ensaiada pelos autores.

Figura 12 – Corpo de prova - Menegon e Vargas (2018)



Fonte: Menegon e Vargas (2018)

Com 28 dias de idade, Menegon e Vargas (2018) desmoldaram todas as lajes, e logo em seguida realizaram um ensaio de flexão a quatro pontos, sendo a

carga aplicada sobre uma viga metálica, que transmitiu o carregamento às lajes através de dois roletes metálicos posicionados nos terços médios do vão teórico das mesmas

Como resultados, Menegon e Vargas (2018) obtiveram, para o grupo de lajes com vão livre de 180cm, o carregamento para a flecha limite de, em média, 14,09 KN para as lajes treliçadas e 16,32 KN para as lajes com vigotas de concreto armado comum, correspondendo à um acréscimo de 15,83% em relação às lajes treliçadas. No segundo grupo ensaiado, com vão livre de 300cm, o acréscimo das lajes com vigotas de concreto armado comum sobre as lajes treliçadas foi de 29,02%. Porém, utilizando um método estatístico de análise de variância, os autores constataram que não houve diferença significativa entre as amostras.

Analisando os carregamentos de ruptura para os dois tipos de lajes, Menegon e Vargas (2018) constataram que as amostras do grupo com menor vão livre apresentaram menores deslocamentos e suportaram maiores cargas em relação ao grupo B, porém só houve diferença estatisticamente significativa para as cargas, segundo os autores. Em situação de deslocamento máximo previsto pela NBR 6118 (ABNT, 2014), os autores concluem que as lajes treliçadas não apresentaram diferença significativa na capacidade portante em relação às lajes comuns. Os diagramas de carga x deslocamento vertical apresentados pelos autores, dos Grupos A (190cm) e B (310cm), podem ser analisados nas Figuras 13 e 14, respectivamente, sendo as lajes comuns nomeadas como LC's e as lajes treliçadas nomeadas como LT's.

Figura 13 – Diagrama de Carga x flecha Grupo A - Menegon e Vargas (2018)

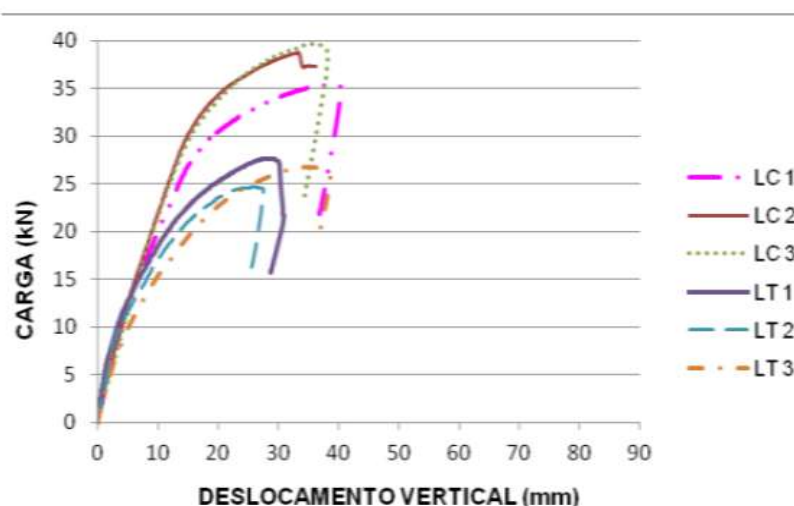
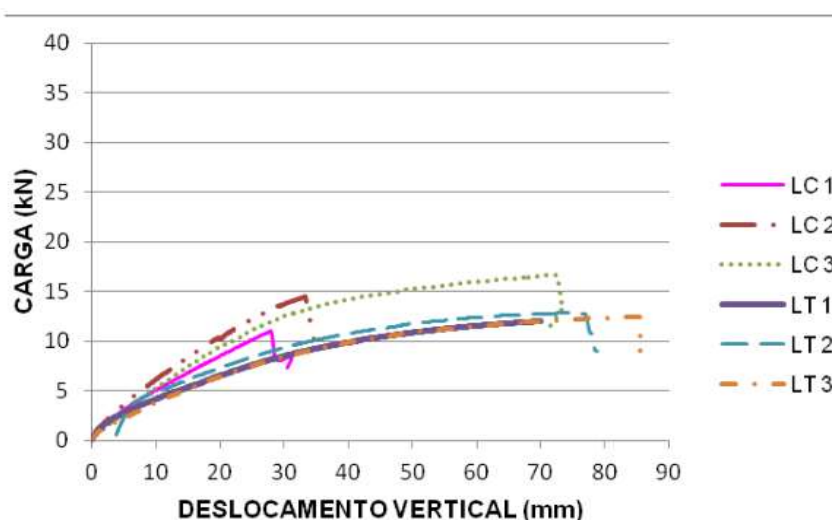


Figura 14 – Diagrama de Carga x Flecha Grupo B - Menegon e Vargas (2018)



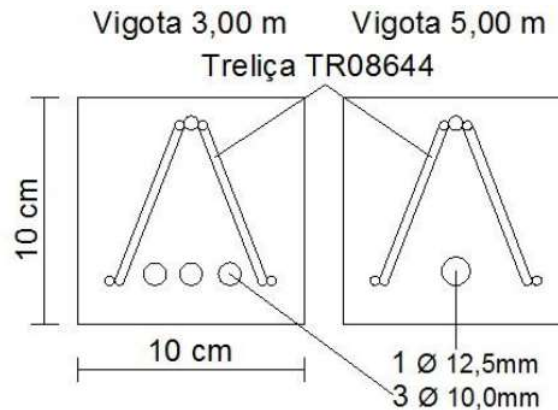
Fonte: Menegon e Vargas (2018)

2.4.5 Trabalho de Pisoni e Vargas (2016)

Em um trabalho com análise experimental que comparou a capacidade portante de vigotas protendidas e vigotas treliçadas, Pisoni e Vargas (2016) apresentaram o diferencial de produzir as vigotas treliçadas unicamente para a sua pesquisa. Com um ensaio de flexão em quatro pontos em duas vigotas protendidas, os autores avaliaram os carregamentos obtidos no limite de deslocamentos segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014), e com isso dimensionaram a armadura extra a ser adicionada nas vigotas treliçadas, para que estas fossem produzidas com a mesma capacidade portante das protendidas ensaiadas, teoricamente.

Considerando somente os banzos inferiores da treliça como influentes na resistência, Pisoni e Vargas (2016) verificaram o momento fletor no instante de flecha máxima em situação de serviço, calcularam a quantidade de área de aço necessária para suportar este momento e definiram quantas barras deveriam ser somadas aos banzos inferiores da treliça, conforme as seções transversais ilustradas na Figura 15. Para a execução das vigotas treliçadas, os autores utilizaram concreto com resistência característica de 40 MPa, para que fosse igualado ao concreto das vigotas protendidas.

Figura 15 – Seções transversais das vigotas de Pisoni e Vargas (2016)



Fonte: Pisoni e Vargas (2016)

Após execução das vigotas treliçadas, Pisoni e Vargas (2016) realizaram ensaios de flexão em quatro pontos, com pontos de aplicação de carga localizados a uma distância de 1/3 de cada extremidade do vão, em 6 vigotas treliçadas e em 6 vigotas protendidas, sendo que para cada tipo 3 possuíam o comprimento de 3,0m (vão livre de 2,9m) e 3 possuíam o comprimento de 5m (vão livre de 4,9m).

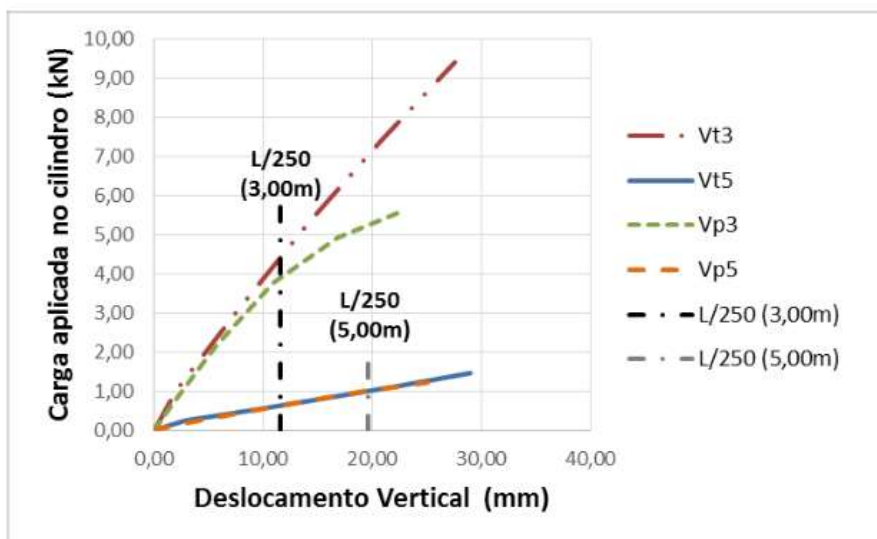
Pisoni e Vargas (2016) apresentam que, para as vigotas protendidas, no deslocamento máximo permitido por norma ($L/250$), as vigotas de 3,00 metros obtiveram um valor médio de carregamento de 2,24 KN, enquanto as de 5,00 metros obtiveram um carregamento médio de 0,86 KN. Na situação de ruptura, as vigotas protendidas de 3,00 metros resultaram em um valor de carregamento médio de 4,16 KN e um deslocamento no centro do vão de 5,33 cm. As vigotas protendidas com 5,00 metros de comprimento obtiveram valor médio de carga de 1,47 KN, e seu deslocamento foi maior que 10 cm, limite de medição do aparelho utilizado no ensaio.

Para as vigotas treliçadas, os resultados de carregamento médio obtido por Pisoni e Vargas (2016), no deslocamento máximo ($L/250$) do estado limite de serviço, foram de 2,49 KN e 0,86 KN, para as vigotas de 3,00 e de 5,00 metros, respectivamente. Na ruptura, os carregamentos médios foram de 7,94 KN e 3,06 KN, e os deslocamentos de 6,15 cm e maiores do que 10 cm, para as vigotas de 3,00 e de 5,00 metros, respectivamente.

Os resultados do trabalho de Pisoni e Vargas (2016) podem ser observados nos gráficos plotados pelos autores, conforme constam nas figuras 16 e 17, o diagrama de carga x deslocamento vertical e o gráfico das cargas no instante de ruptura das vigotas, respectivamente. Nos diagramas, as vigotas protendidas de 3 e

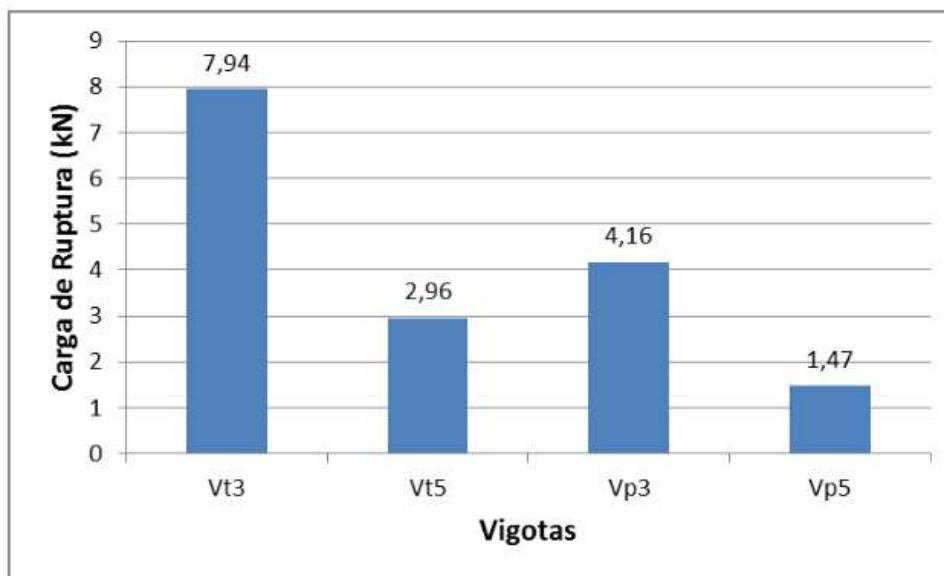
de 5 metros possuem a nomenclatura de Vp3 e Vp5, respectivamente, e as vigotas treliçadas de 3 e de 5 metros são nomeadas como Vt3 e Vt5, respectivamente.

Figura 16 – Diagrama de carga x deslocamento - Pisoni e Vargas (2016)



Fonte: Pisoni e Vargas (2016)

Figura 17 – Cargas no momento de ruptura - Pisoni e Vargas (2016)



Fonte: Pisoni e Vargas (2016)

Como uma das conclusões de seu trabalho, Pisoni e Vargas (2016) afirmam que as vigotas treliçadas obtiveram um aumento significativo de carga na ruptura, totalizando cerca de 100% de acréscimo.

Pisoni e Vargas (2016) ainda apontam uma deficiência no dimensionamento da armadura extra das vigotas treliçadas, explicado pela não consideração dos efeitos

da treliça. Segundo os autores, além dos banzos inferiores, a armadura treliçada tem uma influência considerável na resistência da vigota.

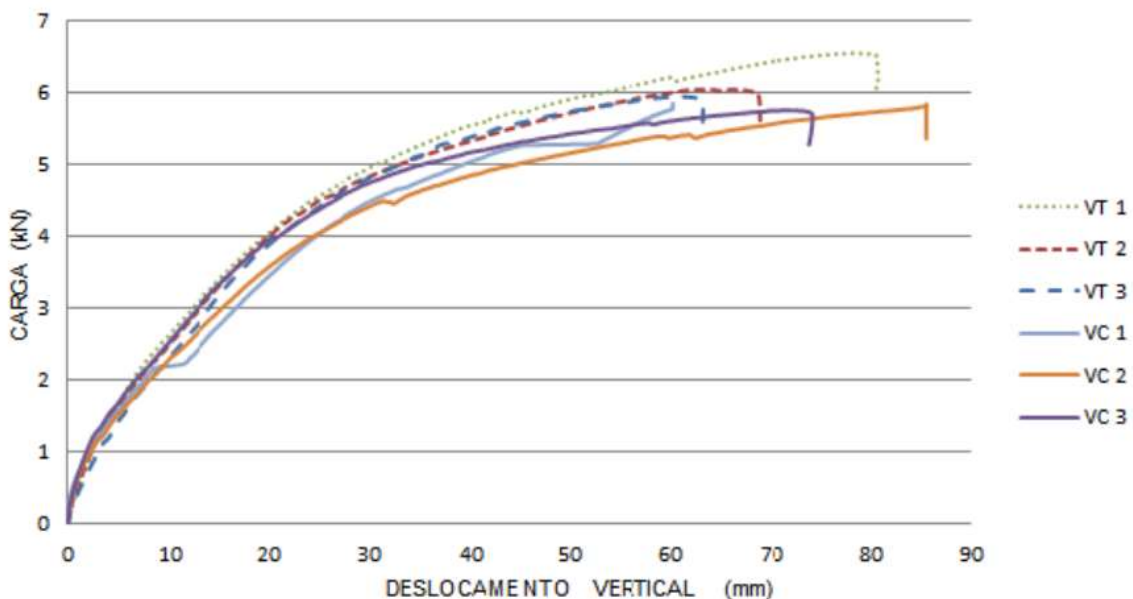
2.4.6 Trabalho de Grando e Vargas (2018)

O trabalho científico de Grando e Vargas (2018) se assemelha ao trabalho de Menegon e Vargas (2018), diferindo no tipo de bloco de enchimento utilizado e principalmente no tipo de consideração da seção das lajes, sendo que Grando e Vargas (2018) utilizaram blocos cerâmicos ao invés de EPS e não realizaram sua análise considerando a capa de concreto da seção, não caracterizando a mesma como uma seção “T”.

Com resistência do concreto à compressão de 18,57 MPa, em média, aos 28 dias, Grando e Vargas (2018) obtiveram os valores de carregamento médio para o deslocamento limite de serviço ($L/250$) de dois grupos de corpos de prova, com vãos de 3,0 m e de 1,8 m.

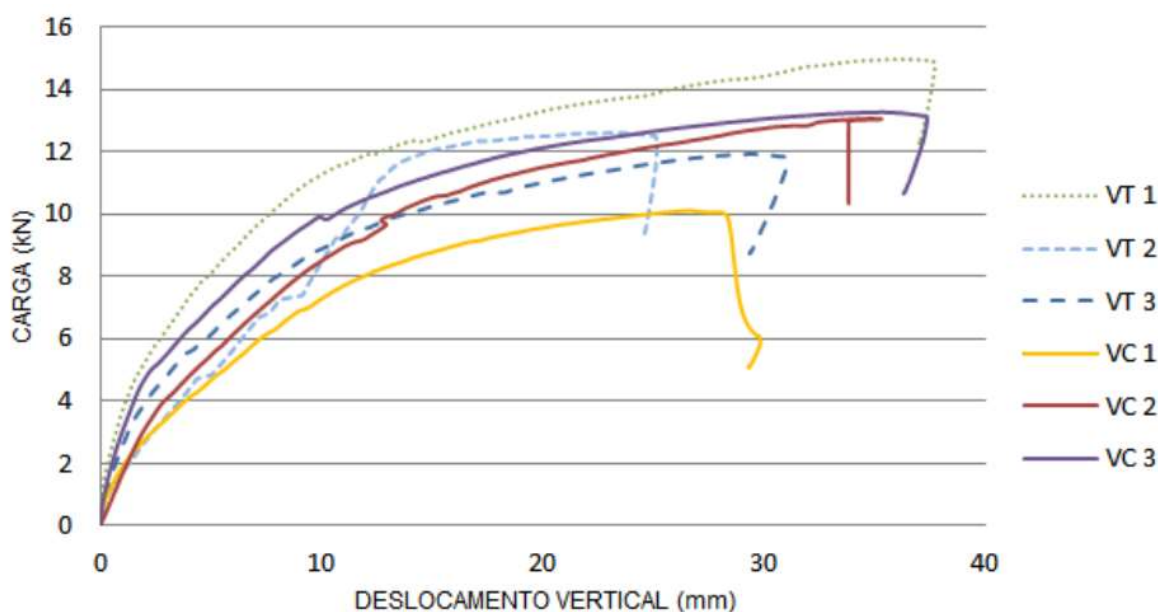
Grando e Vargas (2018) obtiveram, como resultados dos procedimentos experimentais os seguintes valores, que também foram apresentados em diagramas de carga x deslocamento, para o grupo com vão livre de 3,0 m e de 1,8 m, aqui apresentados respectivamente nas Figuras 18 e 19, com nomenclatura de VT para protótipos com vigotas treliçadas e de VC para protótipos com vigotas comuns.

Figura 18 – Diagrama de carga x deslocamento - 3,00 m de vão - Grando e Vargas (2018)



Fonte: Grando e Vargas (2018)

Figura 19 – Diagrama de carga x deslocamento - 1,80 m de vão - Grando e Vargas (2018)



Fonte: Grando e Vargas 2018)

- No grupo com vão livre de 3,0 m, as cargas médias para os deslocamentos limites foram de 2,8 kN e de 2,57 kN para as lajes com vigotas treliçadas e as comuns, respectivamente. Já no grupo com vão livre de 1,8 m, os valores de carga média obtidos foram de 8,45 kN e de 7,29 kN, para as lajes com vigotas treliçadas e as comuns, respectivamente.

- Para a ruptura, o grupo com vão livre de 3,00 metros apresentou cargas de 6,18 kN e 6,02 kN, e deslocamentos de 6,84 cm e 7,25 cm, para as lajes com vigotas treliçadas e as comuns, respectivamente. No grupo com vão livre de 1,80 metros as cargas médias de ruptura foram de 13,16 kN e 12,15 kN, e os deslocamentos de 3,07 cm e 3,19 cm, para as lajes com vigotas treliçadas e as comuns, respectivamente.

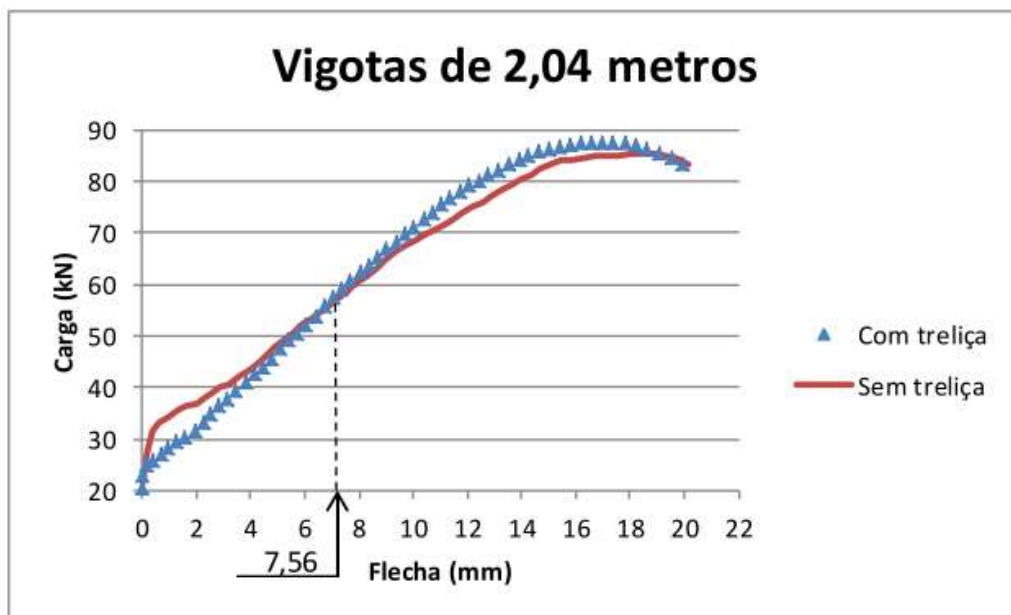
Grando e Vargas (2018) concluem que, mesmo com seção maior e melhor aderência com o concreto moldado *in loco* proporcionado pela treliça das vigotas treliçadas, estas não apresentaram diferenças percentuais estatisticamente significativas, quando comparadas com as cargas aplicadas nas lajes com vigotas comuns, armadas apenas com armadura de combate à flexão, contrariando a sua hipótese inicial.

2.4.7 Trabalho de Diniz e Vargas (2016)

Também analisando a influência da treliça eletrosoldada nas flechas de lajes pré-moldadas, Diniz e Vargas (2016) realizaram um trabalho semelhante ao de Menegon e Vargas (2018) e de Grandó e Vargas (2018), diferindo somente nas distâncias entre vãos adotadas e principalmente no fato de que neste trabalho foram analisadas somente vigotas isoladas.

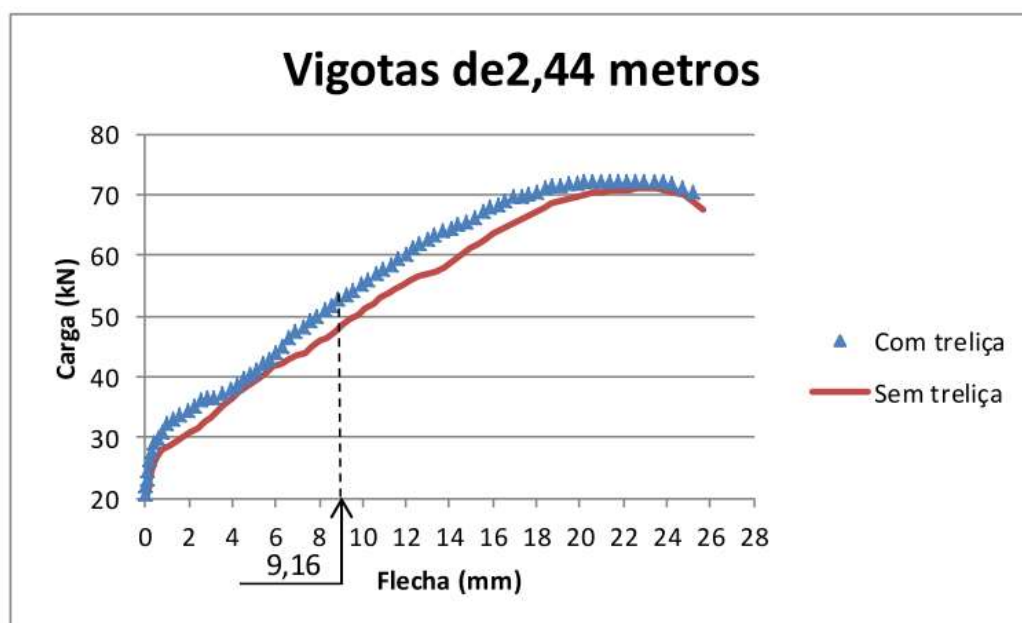
Após realização de ensaios de flexão a quatro pontos sobre três grupos de vigotas, cada um composto por 3 vigotas treliçadas e 3 vigotas somente com armadura de combate à flexão, com vãos livres de 2m, 2,4m e 2,8m, Diniz e Vargas (2016) apresentam como resultados diagramas de carga x flecha, demonstrados aqui, nas Figuras 20, 21 e 22, sendo dos grupos com 2,04m, 2,44m e 2,84m de comprimento, respectivamente.

Figura 20 - Diagrama de carga x flecha de vigotas com 2,04 metros - Diniz e Vargas (2016)



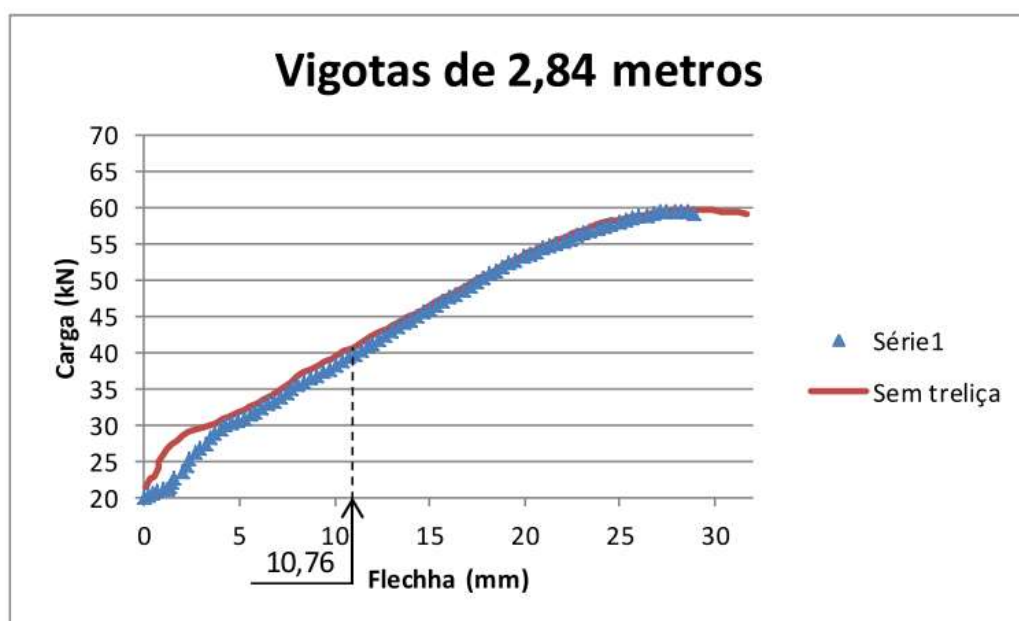
Fonte: Diniz e Vargas (2016)

Figura 21 – Diagrama de carga x flecha de vigotas com 2,44 metros - Diniz e Vargas (2016)



Fonte: Diniz e Vargas (2016)

Figura 22 – Diagrama de carga x flecha de vigotas com 2,84 metros - Diniz e Vargas (2016)



Fonte: Diniz e Vargas (2016)

Ao fim de seu trabalho, Diniz e Vargas (2016) concluem que para os comprimentos e quantidades de amostras ensaiadas, a armação treliçada não interferiu significativamente nos resultados, após análise estatística dos resultados.

2.5 Análise da revisão de trabalhos experimentais

Envolvendo lajes treliçadas, temos primeiramente o trabalho de Nakao *et al.*, (2005), que mesmo antigo, já afirma que os resultados experimentais obtidos de ensaios de flexão em lajes treliçadas mostram que os valores de cargas resistentes de projeto são bastante conservadores, do mesmo modo que Barbieri (2016), anos depois, se referindo aos parâmetros de cálculo das normas brasileiras.

Porém cabe-se apontar que, analisando o trabalho de Nakao *et al.*, (2005), deve ser levado em consideração a metodologia de aplicação de carga no ensaio, onde a carga é concentrada em um único segmento transversal de laje, gerando esforços de cisalhamento, diferentemente dos outros trabalhos apresentados que, por aplicarem a carga em dois pontos no terço central do vão, obtiveram flexão pura no ponto central. As vigotas treliçadas, que foram objeto de estudo de Nakao *et al.*, (2005), apresentam bom combate aos esforços cisalhantes, devido à presença das barras diagonais da treliça.

Ainda sobre lajes treliçadas, comparando os trabalhos de Diniz e Vargas (2016), Menegon e Vargas (2018) e Grando e Vargas (2018), observa-se que os autores concluíram que a armação em treliça não representam uma influência estatisticamente significativa sobre as vigotas de concreto armado comum, mesmo Diniz e Vargas (2016) tendo analisado as vigotas isoladamente, Grando e Vargas (2018) as terem analisado considerando a capa de concreto como uma seção “T”, e Menegon e Vargas (2018) as terem considerado formando um protótipo de laje (3 vigotas e dois blocos de enchimento).

Já o trabalho de Pisoni e Vargas (2016) verificam que as vigotas treliçadas obtiveram um aumento significativo de carga na ruptura, totalizando cerca de 100% de acréscimo quando comparadas às vigotas protendidas. Isso pode ser explicado pelo fato de os autores terem realizado a equivalência entre as vigotas na situação de flecha máxima, por meio de adição de armadura na vigota treliçada. Esta equivalência pode ser confirmada ao se analisar as cargas das vigotas na situação de flecha máxima do trabalho dos autores, onde os valores de carga média entre as vigotas protendidas e as treliçadas se assemelham muito.

Ainda quanto à protensão, Merlin *et al.* (2005) afirmam que o maior benefício da mesma é na região de serviço, resultando em um deslocamento muito inferior ao de painéis de lajes com vigotas sem protensão.

Pode-se então, por fim, confirmar as vantagens e desvantagens de cada tipo de vigota, apresentados na Tabela 1 deste trabalho. As vigotas treliçadas não apresentam benefícios em relação à diminuição de deslocamentos verticais, porém esta é uma característica notada em resultados de trabalhos com protensão nas vigotas. Por outro lado, as lajes treliçadas permitem a execução de nervuras transversais e de lajes bidirecionais, o que as lajes com vigotas protendidas não permitem.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo são descritos os materiais utilizados nos procedimentos experimentais, suas propriedades, características, dimensões e justificativas para sua escolha, bem como a descrição e justificativa dos passos do procedimento experimental, de maneira explicativa e caracterizadora.

Foram ensaiados seis protótipos representativos de lajes pré-moldadas, sendo três deles utilizando vigotas de concreto armado protendido e três deles utilizando vigotas treliçadas. As dimensões dos corpos de prova são de 2,1 m de comprimento para todas as lajes, de 0,5 m de largura para as lajes com vigotas protendidas e 0,54 m de largura para as lajes com vigotas treliçadas, em planta.

Os protótipos com vigotas protendidas são nomeados como LP1, LP2 e LP3, e os de lajes treliçadas são nomeados como LT1, LT2 e LT3.

Todos os protótipos foram submetidos a ensaios de flexão a três pontos, de modo que se obtiveram os valores de deslocamentos e cargas aplicadas, por meio de uma máquina de ensaios mecânicos e sensores externos.

Além do procedimento experimental, foi realizado um estudo analítico sobre os custos de lajes com vigotas protendidas e com vigotas treliçadas, de modo que se obtiveram valores comparativos de custos. Para a comparação, foram utilizados os coeficientes de composições analíticas de serviços, determinados pelo Sistema Nacional de Pesquisa de Custos da Construção Civil (SINAPI), além de dados obtidos sobre custos através de um levantamento realizado no mercado regional.

3.1 Materiais

Os materiais necessários para a execução dos protótipos das lajes foram:

- Vigotas pré-moldadas de concreto armado protendido;
- Vigotas pré-moldadas treliçadas;
- Blocos de enchimento (tabelas cerâmicas);
- Armadura de distribuição;
- Concreto da capa;

3.1.1 Vigotas protendidas

As vigotas de concreto armado protendido adotadas foram de 9 centímetros de altura, com 3 fios protendidos de $\phi 4$ mm e com 2,1 metros de comprimento cada. Segundo o fabricante, o concreto constituinte é da classe C40 (40 MPa de resistência

característica à compressão), e o aço utilizado nos fios é o Aço CP 175 RB E, próprio para a protensão. Conforme discorrido em 2.1, segundo a NBR 7482 (ABNT, 2008), significa um aço com resistência característica à ruptura de 175 kN/cm², de relaxação baixa e com a presença de entalhes no fio.

Previamente à montagem dos protótipos, foram verificados os parâmetros das vigotas protendidas a serem utilizadas, como o cobrimento das armaduras, bitola e posicionamento das barras e a homogeneização das superfícies. Foi constatado que os parâmetros atendiam às predefinições, apresentando acabamento, precisão das dimensões e qualidade do material elevadas.

3.1.2 Vigotas treliçadas

As vigotas treliçadas utilizadas foram as com a treliça TR08644, sem ferragem adicional, com a treliça embutida na capa de concreto, o que resulta em uma altura total de 9,5 cm da vigota. O fabricante das vigotas treliçadas informa que a sua base de concreto foi executada com concreto de resistência característica à compressão de 25 MPa, e que a treliça eletrosoldada embutida na mesma utiliza aço CA 50, estando de acordo com a NBR 14859-1 (ABNT, 2016).

As dimensões do elemento com vigotas treliçadas segue de acordo como descrito em 2.2, com o código definido pela NBR 9062 (ABNT, 2017). Para a treliça TR08644 tem-se a altura de 8cm, diâmetros de 6mm para o banzo superior, e 4mm para as diagonais e banzos inferiores. As dimensões da treliça foram verificadas, assim como os demais parâmetros das vigotas treliçadas, como cobrimento e posicionamento das armaduras e a espessura da base de concreto das mesmas. Foi constatado que todos os parâmetros atendiam às predefinições.

3.1.3 Blocos de enchimento (tabelas)

A norma NBR 14859-1 (ABNT, 2016) dita as dimensões padronizadas estabelecidas e as informações de fabricação dos blocos de enchimento. Quanto à resistência dos mesmos, a referida norma somente estabelece limites referentes às cargas de serviço, para suporte durante as etapas de concretagem e cura, não interferindo na resistência da laje à flexão e, portanto, não causando efeito sobre os resultados deste procedimento experimental.

Ainda segundo a NBR 14859-1 (ABNT, 2016), a altura das lajes deve variar de acordo com a altura dos blocos de enchimento, conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 - Altura das lajes de acordo com o elemento de enchimento

Altura do enchimento (cm)	Altura total da Laje (cm)
7,0	10,0 ; 11,0 ; 12,0
8,0	11,0 ; 12,0 ; 13,0
10,0	14,0 ; 15,0
12,0	16,0 ; 17,0
16,0	20,0 ; 21,0
20,0	24,0 ; 25,0
24,0	29,0 ; 30,0
29,0	34,0 ; 35,0

Fonte: Adaptado da NBR 14859-1 (ABNT, 2016)

A largura dos blocos de enchimento ainda resulta, combinada com as dimensões das vigotas utilizadas, no intereixo, medido transversalmente entre os centros de duas vigotas consecutivas. Conforme a NBR 14859-1 (ABNT, 2016), tem-se intereixos mínimos conforme o tipo de vigota adotado, sendo estes conforme a Tabela 4.

Tabela 4 – Intereixos mínimos padronizados

Tipo de Vigota	Intereixo mínimo (cm)
VC	33,0
VP	40,0
VT	42,0

Fonte: Adaptado da NBR 14859-1 (ABNT, 2016)

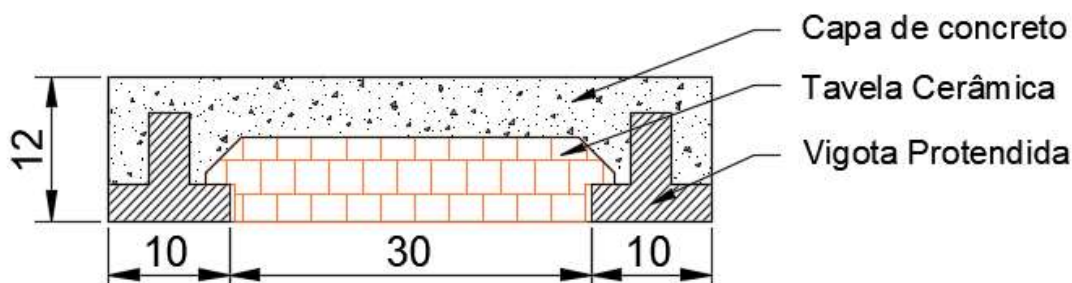
A mesma norma ainda dita que para lajes treliçadas com altura total menor que 13 cm, o valor do intereixo mínimo pode ser considerado como 40 cm.

Os blocos de enchimentos utilizados para a construção de todas as lajes neste trabalho foram os mesmos, para que se mantivesse o mesmo intereixo e dimensões equivalentes, assim como o volume das nervuras, possibilitando a melhor comparação.

Foram utilizados blocos cerâmicos com 7 cm de altura, largura de 30 cm e comprimento na direção das vigotas de 20 cm. Confirma-se que as dimensões das lajes ensaiadas estão de acordo com as definições da NBR 14859-1 (ABNT, 2016), considerando-se que a altura total das lajes foi de 12 cm e o intereixo resultante foi de

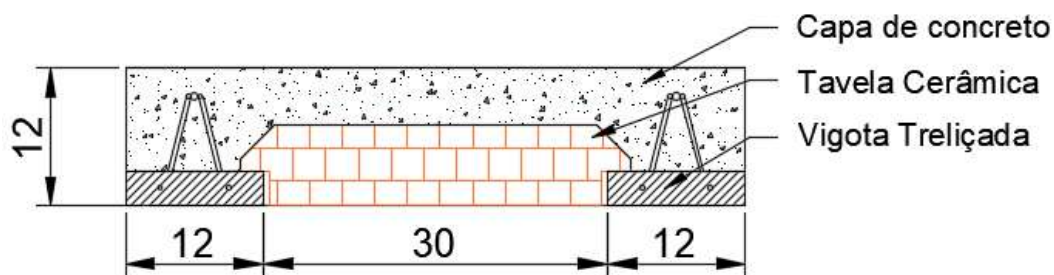
40 cm para as lajes com vigotas protendidas e 42 cm para as lajes com vigotas treliçadas, conforme apresentado nas figuras 23 e 24.

Figura 23 – Esquema da seção das Lajes Protendidas (Dimensões em cm)



Fonte: Elaboração própria

Figura 24 – Esquema da seção das Lajes Treliçadas (Dimensões em cm)



Fonte: Elaboração própria

3.1.4 Armadura de distribuição

Segundo a NBR 14859-1 (ABNT, 2016), as lajes pré-fabricadas podem possuir armaduras complementares, sendo estas caracterizadas como armaduras adicionadas na obra, dimensionadas e dispostas de acordo com o projeto de laje.

Destaca-se a armadura de distribuição, que permite um melhor travamento da laje com a estrutura, além de combater o cisalhamento entre abas e alma das vigotas. A armadura tem por objetivo promover um comportamento conjunto mais efetivo da laje com a estrutura, reduzir os efeitos da retração diferencial entre o concreto moldado no local e o concreto pré-moldado, propiciar melhor distribuição transversal de cargas localizadas, reduzir a abertura de fissuras devida à retração e aos efeitos térmicos e propiciar um comportamento mais efetivo de diafragma, na transferência de ações (DROPPA JÚNIOR, 1999).

A armadura de distribuição colocada na capa de concreto complementar deve possuir seção de, no mínimo, $0,9 \text{ cm}^2/\text{m}$ para aços CA 25 e de $0,6 \text{ cm}^2/\text{m}$ para os aços

CA 50 e CA 60, contendo pelo menos três barras por metro, segundo a NBR 14859-1 (ABNT, 2016).

Neste procedimento experimental, sobre as vigotas e tabelas cerâmicas, foi adicionada uma tela metálica como armadura de distribuição, composta por barras de $\phi 4,2$ mm (CA 50), distanciadas 15 cm nos dois sentidos, o que resultou em uma seção de pelo menos $0,83 \text{ cm}^2/\text{m}$ nos dois sentidos, atendendo ao mínimo exigido pela NBR 14859-1 (ABNT, 2016).

3.1.5 Concreto da capa

As capas de concreto das lajes deste trabalho podem ser consideradas como seção resistente, por possuírem espessura de 5 cm e, segundo a NBR 14859-1 (ABNT, 2016), para capas com mais de 3 cm de espessura, para fins de cálculo, esta consideração pode ser feita. A mesma norma ainda dita que o concreto da capa deve possuir resistência à compressão de, no mínimo, classe C20, a 28 dias de idade.

O concreto da capa das lajes foi executado conforme o traço em massa de 1:2,71:3,58 (cimento : areia : agregado graúdo), com relação água/cimento de 0,6. Na Tabela 5 pode-se observar o traço em massa dos materiais utilizados.

Tabela 5 – Composição de materiais do concreto da capa

Material	Quantidade (kg/m³)
Cimento	300
Areia	814
Brita	1074
Superplastificante	1,5
Água	180

Fonte: Elaboração própria

O cimento utilizado foi o CP IV, o agregado miúdo utilizado foi a areia lavada, o agregado graúdo a brita 0 e a água de amassamento foi a da rede de abastecimento da cidade de Alegrete – RS. O superplastificante utilizado foi o *MC-Powerflow 2141*.

Ao todo, foram moldados 10 corpos de prova cilíndricos, que foram desmoldados após 48 horas da concretagem, e posteriormente mantidos em ambiente com umidade controlada até atingirem idade superior a 28 dias. Após este período, foram submetidos a ensaios de compressão simples, para que fossem obtidos os valores das resistências à compressão dos concretos das capas de cada protótipo de laje.

3.2 Considerações iniciais

O pré-dimensionamento dos protótipos de laje engloba as definições de suas características construtivas e limites teóricos das propriedades físicas, conforme a disposição dos ensaios.

Para que as características entre os dois tipos de lajes se mantivessem constantes, foi adotada a mesma espessura, comprimento, vão livre e ponto de aplicação de carga em todos os protótipos ensaiados.

Da NBR 6118 (ABNT, 2014), toma-se como definição de ambiente de projeto o Urbano, resultando na classe II de agressividade ambiental, com pequeno risco de deterioração da estrutura e uma agressividade moderada.

Considerando a classe de agressividade ambiental definida e o elemento como laje, pode-se definir o cobrimento nominal, conforme a NBR 6118 (ABNT, 2014). Para lajes de concreto armado, com uma classe de agressividade ambiental II, o cobrimento nominal é de 25mm.

A referida norma apresenta um cobrimento diferente para estruturas com concreto armado protendido. Neste trabalho, a armadura protendida está presente no interior das vigotas protendidas pré-moldadas, e o seu cobrimento é garantido pelo fabricante.

Quanto à armadura de distribuição, a NBR 6118 (ABNT, 2014) dita que esta deve respeitar os cobrimentos para concreto armado. Para todos os protótipos de lajes, o cobrimento nominal de 2,5 cm foi respeitado.

Os pontos de apoio foram localizados a uma distância de 9 cm de cada bordo da laje, em sentido transversal à disposição das vigotas, resultando em uma laje biapoiada com um vão livre de 1,92 metros. Na região dos apoios foi realizado um reforço, constituído pela execução da concretagem total da seção nos primeiros 15 cm de cada bordo apoiado, sem a utilização de blocos de enchimento nesta faixa, conforme demonstrado na Figura 25. O reforço foi realizado com a intenção de evitar deformações e movimentações verticais na região dos apoios.

Figura 25 – Posicionamento do reforço na região dos apoios



Fonte: Elaboração própria

Na execução de lajes pré-moldadas, as vigotas devem ser apoiadas por linhas de escoras que, conforme a NBR 14859-1 (ABNT, 2016), têm seu espaçamento determinado pelo tipo de vigota e as cargas na fase de montagem e concretagem.

O cimbramento de todos os protótipos de lajes neste procedimento experimental foi igual, com a distância de 1,84 metros entre linhas de escoras, composto por tábuas de 15 cm posicionadas nas extremidades das fôrmas, ao fundo. Estas tábuas ainda fizeram o papel de fôrma para a concretagem dos reforços, conforme a Figura 25.

Os parâmetros das lajes podem ser observados na Tabela 6.

Tabela 6 – Parâmetros dos protótipos (cm)

Parâmetros	Lajes Protendidas (LP)	Lajes Treliçadas (LT)
Altura das vigotas	9	9,5
Largura das vigotas	10	12
Altura do enchimento	7	7
Altura da capa	5	5
Altura total da Laje	12	12
Largura total da Laje	50	54
Vão livre	192	192
Distância das escoras	184	184

Fonte: Elaboração própria

Pode-se notar a diferença de altura entre as vigotas protendidas (9 cm) e as vigotas treliçadas (8 cm da treliça somados com 1,5 cm de cobertura na base), o que resulta na diferença de espessuras do concreto sobre as mesmas. Porém, destaca-se que estas são diferenças características de cada vigota e se enquadram na análise deste trabalho como particularidades de cada uma, mantendo válido o objetivo de comparação da influência. Ainda a espessura da capa de concreto da laje é medida a partir da face superior do bloco de enchimento, portanto a capa apresentou espessura igual em todos os protótipos neste trabalho.

Do mesmo modo, a diferença de largura entre as vigotas protendidas e as treliçadas (o que resulta em uma diferente largura total da laje), é considerada uma característica imposta pelas vigotas nas lajes.

Para a posterior realização das análises comparativas, alguns valores relevantes, dos resultados dos ensaios, são destacados, sendo eles:

- Carga de plastificação (fim do regime elástico) detectada nos diagramas e o deslocamento correspondente à esta carga;
- Carregamento na situação de flecha limite da NBR 6118 (ABNT, 2014);
- Carregamento máximo resistido e o deslocamento medido neste ponto.

Para a obtenção destes valores, fez-se a média aritmética entre os 3 protótipos de cada tipo de laje, tendo-se assim valores representativos.

Para a comparação de carregamento suportado na situação de flecha máxima, teve-se que determinar o valor da mesma. Pelo critério de dimensionamento da NBR 6118 (ABNT, 2014), a flecha máxima para aceitabilidade visual neste tipo de elemento é de $L/250$. Como todos os vãos teóricos dos protótipos são iguais (1,92 metros), o valor do deslocamento limite previsto em norma é de 7,68 mm para todos. Nos ensaios, este valor foi ultrapassado para que as lajes atingissem a ruptura, e o valor do carregamento suportado por cada tipo de laje pré-moldada no valor de flecha limite da norma foi identificado somente para a análise dos resultados. Esta medida foi tomada devido à grande diferença de valores entre o ELS e o ELU, como observado nos resultados das bibliografias já revisadas na seção 2.

3.3 Programa Experimental

O programa experimental pode ser descrito nas seguintes etapas.

- Execução das lajes:
 - Montagem das fôrmas;

- Distribuição dos elementos pré-moldados e dos elementos de enchimento;
- Concretagem da capa;
- Cura;
- Ensaios:
 - Instrumentação, equipamentos e aparelhagem;
 - Montagem dos ensaios;
 - Execução dos ensaios;

3.3.1 Execução das lajes

A correta execução das lajes é de extrema importância para obtenção de resultados comparativos representativos, devendo-se tomar cuidado com as dimensões finais e possíveis imperfeições provenientes da execução. Consiste no processo de criação dos protótipos que serviram como corpos de prova, até o momento da realização dos ensaios, e é descrito nas seguintes etapas.

3.3.1.1 Montagem das fôrmas

Para a montagem das fôrmas foram utilizadas tábuas de Pinheiro Americano, com espessura de 20mm e altura de 15cm. Para o travamento das laterais foram utilizados segmentos de ripas de madeira. A fôrma não possuiu base, pois as vigotas e os elementos de enchimento atuaram como base da mesma.

Visando o máximo aproveitamento dos materiais empregados, as lajes foram dispostas lado a lado, de forma que a tábua lateral de uma serviu também para a outra.

3.3.1.2 Distribuição da pré-laje

Os elementos pré-moldados e de enchimento podem ser tratados como pré-laje. A distribuição dos mesmos ocorreu após a montagem das fôrmas, de modo que as vigotas e as tabelas desempenharam o papel de suporte do concreto da capa.

Em cada fôrma de laje, foram dispostas duas vigotas, uma em cada extremidade lateral da fôrma, e posteriormente as tabelas foram acomodadas entre as mesmas. Sobre os elementos pré-moldados foi disposta a malha metálica que atuou como armadura de distribuição, conforme apresentado em 3.1.4. O resultado pode ser observado na Figura 26, que apresenta um dos Grupos de lajes.

Figura 26 - Pré-laje e armadura de distribuição disposta nas fôrmas.



Fonte: Elaboração própria

3.3.1.3 Concretagem da capa

A mistura do concreto ocorreu em uma betoneira com capacidade máxima de 400 litros, do Laboratório de Engenharia Civil no campus Alegrete, da UNIPAMPA.

Os materiais utilizados foram previamente secados e pesados, de acordo com o traço apresentado em 3.1.5.

De forma a facilitar a homogeneização dos materiais na betoneira, esta não foi operada em sua capacidade máxima, mas sim em 4 betonadas, para que fosse realizada a concretagem de duas lajes por vez, sendo uma protendida e uma treliçada.

Do concreto de todas as betonadas, foram moldados corpos de prova cilíndricos, com dimensões de 100 mm x 200 mm, totalizando 10 corpos de prova. Ainda foi realizado, para todas, o Ensaio de Abatimento do Tronco de Cone. A média dos valores de abatimento foi de 17,5 cm, variando entre 16 cm e 18,5 cm.

Com idade de 48 horas os corpos de prova cilíndricos foram desmoldados e colocados em ambiente com umidade controlada para a cura. Decorridos 28 dias da moldagem, os mesmos foram submetidos a ensaios de compressão axial.

Previamente à concretagem das lajes, foram posicionados ganchos metálicos no interior das mesmas, para que se facilitasse o deslocamento após a cura. Na Figura 27 pode-se observar os ganchos sendo concretados com as lajes, além do segmento de tábua que foi utilizado para que se garantisse a mesma espessura de concreto por toda a laje.

Figura 27 - Concretagem das lajes com ganchos



Fonte: Elaboração própria

3.3.1.4 Cura

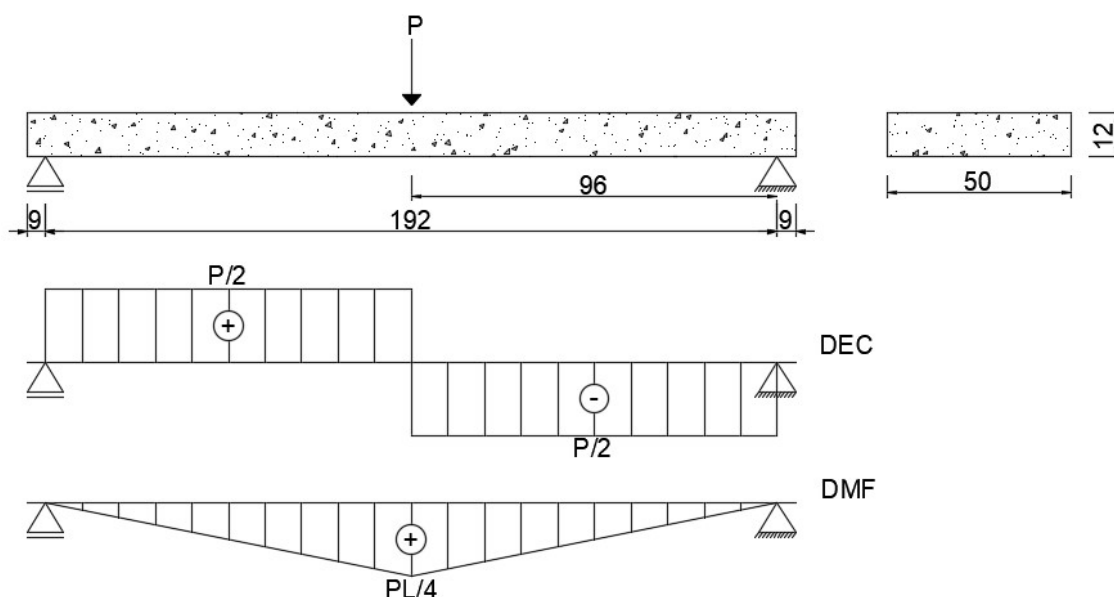
A cura foi realizada com o cobrimento das lajes com lona, sendo que durante os primeiros 7 dias após a concretagem foi mantida uma película de água sobre as mesmas. As lajes permaneceram nas fôrmas e em condições ambientes até a realização dos ensaios.

3.3.2 Ensaios

A determinação do método de execução dos ensaios deu-se pelo embasamento sobre os trabalhos experimentais já realizados, visando a melhor comparação dos resultados.

Foi optado pela realização do ensaio de flexão a três pontos ao invés do de flexão a quatro pontos, por motivo de que uma das propriedades distintas dos dois tipos de vigotas é a existência de diagonais na treliça da vigota treliçada, o que teoricamente auxilia na resistência à esforços de cisalhamento. Realizando o ensaio de flexão a três pontos tem-se, além de tensão de flexão, também tensão cisalhante no ponto central do vão, conforme demonstrado na Figura 28.

Figura 28 – Diagramas de esforço cortante e momento fletor causados pelo carregamento na flexão (Dimensões em cm)



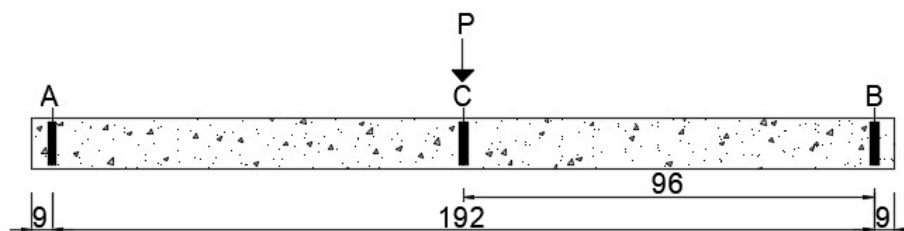
Fonte: Elaboração própria

3.3.2.1 Instrumentação, equipamentos e aparelhagem

De forma a obter os resultados do comportamento de deformação dos protótipos ensaiados, foi realizada a instrumentação de medição dos deslocamentos verticais através de *LVDTs* (do inglês *Linear Variation Displacement Transducers*).

O posicionamento dos *LVDTs* ocorreu em três pontos, em cada laje, sendo eles conforme ilustrado na Figura 29, sendo que no ponto central C, foram posicionados dois leitores.

Figura 29 – Esquema do posicionamento dos *LVDTs* nas lajes (Dimensões em cm)



Fonte: Elaboração própria

O posicionamento dos dois *LVDTs* no ponto central C, pode ser justificado pela leitura de possíveis deslocamentos causados pela acomodação do rolete na superfície, por vezes irregular, da face superior da laje. Com os valores da medição

de deslocamento neste ponto, pôde-se chegar aos reais valores de deslocamento das lajes, possibilitando a correta análise dos deslocamentos máximos das mesmas.

Os *LVDTs* posicionados nas extremidades das lajes, em A e B da Figura 29, proporcionaram, ao se considerar a média aritmética entre os dois valores, a medida do maior deslocamento dos protótipos. Isto se justifica pela configuração de aplicação de carga da prensa utilizada, sendo a parte inferior da prensa a parte móvel e de aplicação do carregamento.

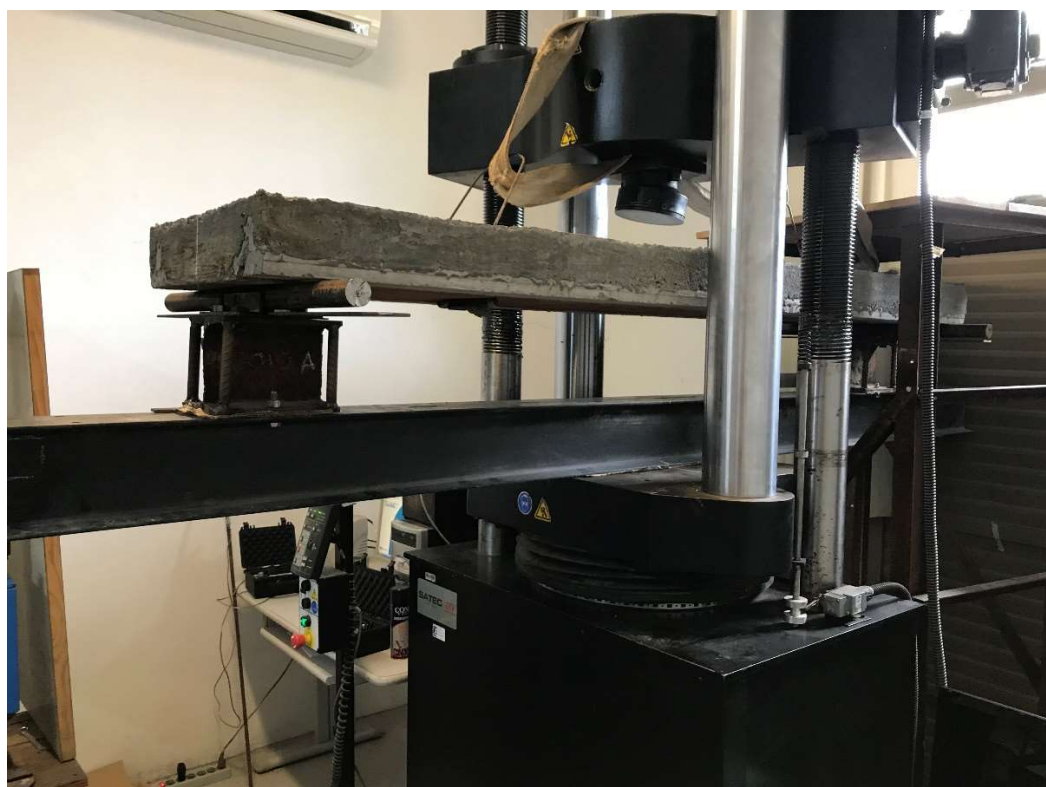
O deslocamento da viga de reação, dos roletes e dos perfis metálicos (considerados deslocamentos de corpo rígido), não interferem na obtenção dos reais deslocamentos das lajes, tendo em vista o posicionamento dos leitores utilizados. Os leitores das extremidades foram posicionados em uma base externa fixa, independente da prensa, e como o rolete superior também se mantém imóvel verticalmente, a leitura dos *LVDTs* das extremidades indicam o deslocamento real da laje.

A metodologia de leitura dos deslocamentos pode ser confirmada ao se levar em conta que, mesmo com a viga de reação sofrendo algum deslocamento, esta ainda transmitiria uma força correspondente à metade da carga total aplicada, para cada apoio, com o rolete superior central se mantendo fixo e concentrando a reação de todo o carregamento (conforme a Figura 28). A afirmação desta total transmissão de forças é possível ao se considerar a viga trabalhando dentro do regime elástico durante todo o ensaio.

3.3.2.2 Montagem dos ensaios

Com os protótipos de lajes já desmoldados e curados, foi realizada a montagem dos ensaios, onde os mesmos foram posicionados na prensa SATEC INSTRON, com capacidade de carga de 1500 KN, no Laboratório de Engenharia Civil da Unipampa, no *campus* Alegrete. A prensa e um dos protótipos sendo posicionado podem ser observados na Figura 30.

Figura 30 – Posicionamento de um protótipo na prensa

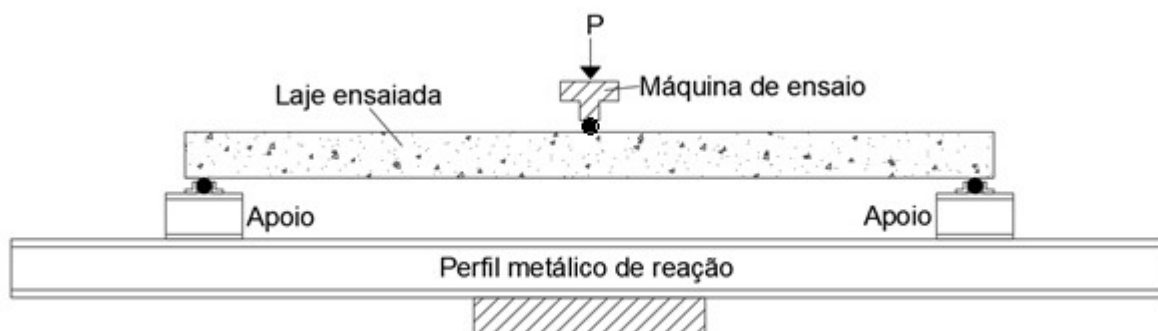


Fonte: Elaboração própria

Como reação para o ensaio das lajes, foi utilizado um perfil metálico, tendo em vista que a base da prensa mecânica utilizada não suporta o comprimento das mesmas. Sobre a viga metálica de reação foram posicionados segmentos de perfis metálicos, e sobre eles, dois roletes metálicos (segmentos de uma barra maciça, lisa, com 5cm de diâmetro), de forma que se obteve a condição de livre rotação nos apoios.

No ponto central do comprimento da laje, distanciado 96 cm de cada apoio, foi posicionado um terceiro rolete metálico liso, para que se garantisse a distribuição do carregamento por toda a seção da laje, uniformemente. O posicionamento do rolete metálico no ponto central do vão, distribui a reação de toda a carga aplicada sobre a laje, resultando na configuração ilustrada na Figura 31, com todo o carregamento “P” atuando na seção central da laje.

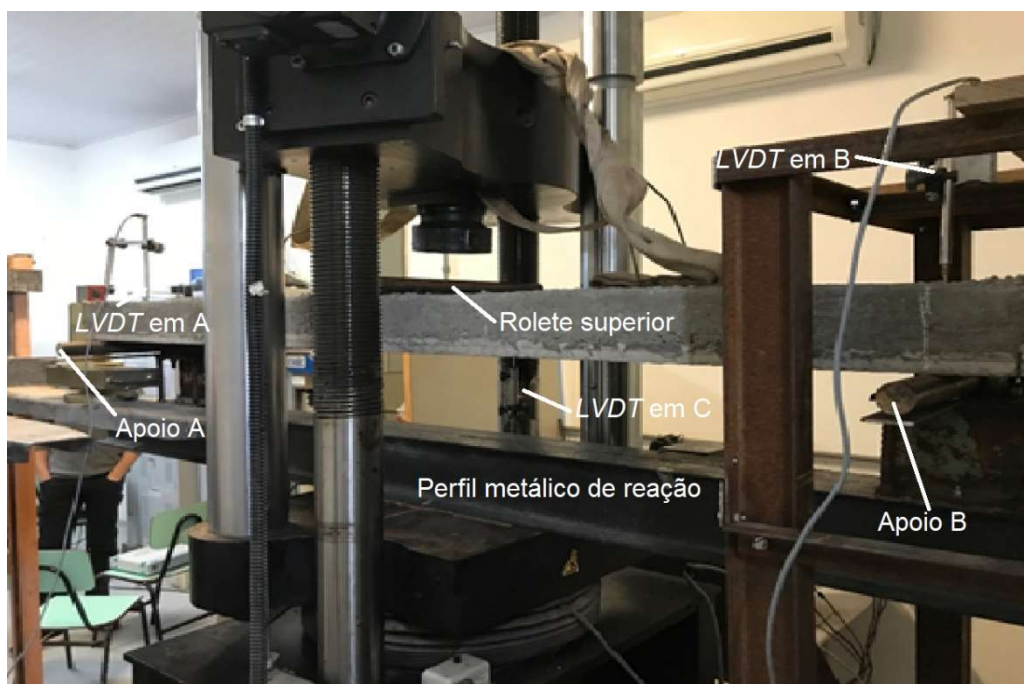
Figura 31 – Esquema de montagem dos ensaios



Fonte: Elaboração própria

A configuração final dos ensaios, com os apoios e a instrumentação posicionada, pode ser observada na Figura 32.

Figura 32 - Laje pronta para ensaio, com instrumentação posicionada



Fonte: Elaboração própria

3.3.2.3 Execução dos ensaios

Após o devido posicionamento das lajes e a instrumentação ser concluída, assim como a conferência de posicionamento e distanciamento dos elementos, o ensaio teve seu início.

O ensaio foi interrompido e seu término foi determinado no momento em que foi identificado o alcance da carga máxima suportada pelas lajes, baseado na diminuição de carga aplicada informada pela prensa conforme o aumento do deslocamento da mesma.

Quanto à velocidade de aplicação do carregamento, cabe-se a observação de que a NBR 14859-1 (ABNT, 2016) não a estabelece para ensaios em conjunto de vigotas e blocos de enchimento. Portanto, foi adotada a velocidade de 0,3 mm/min, que se aproxima de valores com resultados positivos em procedimentos experimentais já realizados em vigas e protótipos de lajes, como no trabalho de Dellatorre (2015).

3.4 Estudo de Custos

Devido ao fato de que os objetos de estudo deste trabalho são as vigotas, os custos de compra das mesmas, no mercado regional, foram levantados e levados em consideração. Porém, ao se tratar dos serviços para a execução de lajes pré-moldadas, nota-se uma discrepância significativa entre os dois tipos de lajes, o que torna este fator relevante para as análises do trabalho.

Foi realizado um estudo analítico de custos de serviços sobre lajes com os dois tipos de vigotas abordados, com base na tabela SINAPI, mantida pela Caixa Econômica Federal. Além disso, foram levantados os custos sobre as vigotas utilizadas nos ensaios deste trabalho, para que se obtivesse uma relação direta entre as propriedades e o custo das mesmas.

É por meio do Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI), que a Administração Pública Federal define valores de insumos e serviços necessários às obras e serviços de engenharia.

Como o objetivo da comparação, neste trabalho, é a definição da proporção de custos de um tipo de laje sobre o outro, foram analisadas as diferenças entre os coeficientes de composições de serviços de lajes pré-moldadas protendidas e treliçadas.

As composições analisadas foram as que mais se aproximam das lajes executadas e ensaiadas no procedimento experimental. Variando apenas o tipo de vigota, a composição abordada foi a de laje pré-moldada unidirecional com vãos menores ou iguais a 3,0 m, biapoiada, com enchimento em cerâmica e altura total da laje de (8 cm enchimento + 4 cm capa).

A composição com vigotas protendidas pode ser observada na Tabela 7. Pode-se observar a ausência de elementos de escoramento. A ausência destes elementos pode ser compreendida ao se observar o tipo de vigota (para vãos até 10 m) e o pequeno vão considerados na composição.

Tabela 7 - Composição de serviços para laje protendida

DESCRIÇÃO	UNIDADE	COEFICIENTE
Carpinteiro de formas com encargos complementares	h	0,139
Servente com encargos complementares	h	0,098
Laje pré-moldada protendida (lajotas + vigotas) com lajota cerâmica 20 x 30 x 8 cm (L x C x A) e vigota VPT 10 x 9 cm (L x A), para piso, unidirecional, sobrecarga de 350 kgf/m ² , vão até 10,0 m (sem colocação)	m ²	1,117
Concretagem de vigas e lajes, fck = 20 MPa, para lajes pré-moldadas com uso de bomba em edificação com área média de lajes menor ou igual a 20 m ² - lançamento, adensamento e acabamento	m ³	0,045

Fonte: Adaptado da tabela SINAPI

Na composição com vigotas treliçadas, apresentada na Tabela 8, tem-se os elementos de escoramento incluídos como um dos serviços necessários para a execução da mesma.

Tabela 8 - Composição de serviços para laje treliçada

DESCRIÇÃO	UNIDADE	COEFICIENTE
Carpinteiro de formas com encargos complementares	h	0,574
Servente com encargos complementares	h	0,406
Laje pré-moldada treliçada (lajotas + vigotas) com lajota cerâmica 20 x 30 x 8 cm (L x C x A) e vigota VTR 12 x 8 cm (L x A), para piso, unidirecional, sobrecarga de 350 kgf/m ² , vão até 4,5 m (sem colocação)	m ²	1,117
Concretagem de vigas e lajes, fck = 20 MPa, para lajes pré-moldadas com uso de bomba em edificação com área média de lajes menor ou igual a 20 m ² - lançamento, adensamento e acabamento	m ³	0,054
Fabricação de escoras do tipo pontalete, em madeira	m	0,970
Tábua madeira 2ª qualidade 2,5 x 20 cm não aparelhada	m	1,870
Prego de aço polido com cabeça dupla 17 x 27	kg	0,040

Fonte: Adaptado da tabela SINAPI

Quanto aos custos das vigotas utilizadas no procedimento experimental, foi realizado o levantamento em duas empresas fabricantes, que são denominadas como Fabricante A e Fabricante B neste trabalho. Cabe-se ainda ressaltar que os materiais utilizados nos ensaios são provenientes do Fabricante A.

Para melhor precisão na comparação com a prática de obra, foram levantados os custos por metro quadrado de lajes com vigotas protendidas e treliçadas, com

tabelas cerâmicas, sendo todos os elementos com as mesmas dimensões dos que foram utilizados nos ensaios deste trabalho.

Foram relacionados também, os custos por metro linear de vigotas protendidas e treliçadas. Este levantamento se faz importante devido à variabilidade do número de vigotas utilizadas por metro quadrado, conforme as dimensões das tabelas utilizadas.

4 RESULTADOS E ANÁLISES

4.1 Quanto ao procedimento experimental

4.1.1 Caracterização do concreto da capa

Dos ensaios de compressão axial simples, executados sobre os corpos de prova cilíndricos, obteve-se o valor médio de resistência característica à compressão igual a 24,25 MPa, com uma variação de valores de, no máximo 7,1%.

O concreto da capa de lajes pré-moldadas deve ser de, no mínimo, Classe C20, de acordo com a NBR 14859-1 (ABNT, 2016), como apresentado em 3.1.5. Portanto, pode-se afirmar que a capa de todas as lajes atende às predefinições da referida norma, além de tornar válida a comparação entre as vigotas das lajes, tendo em vista a pequena variação entre os valores de resistência à compressão do concreto da capa das mesmas.

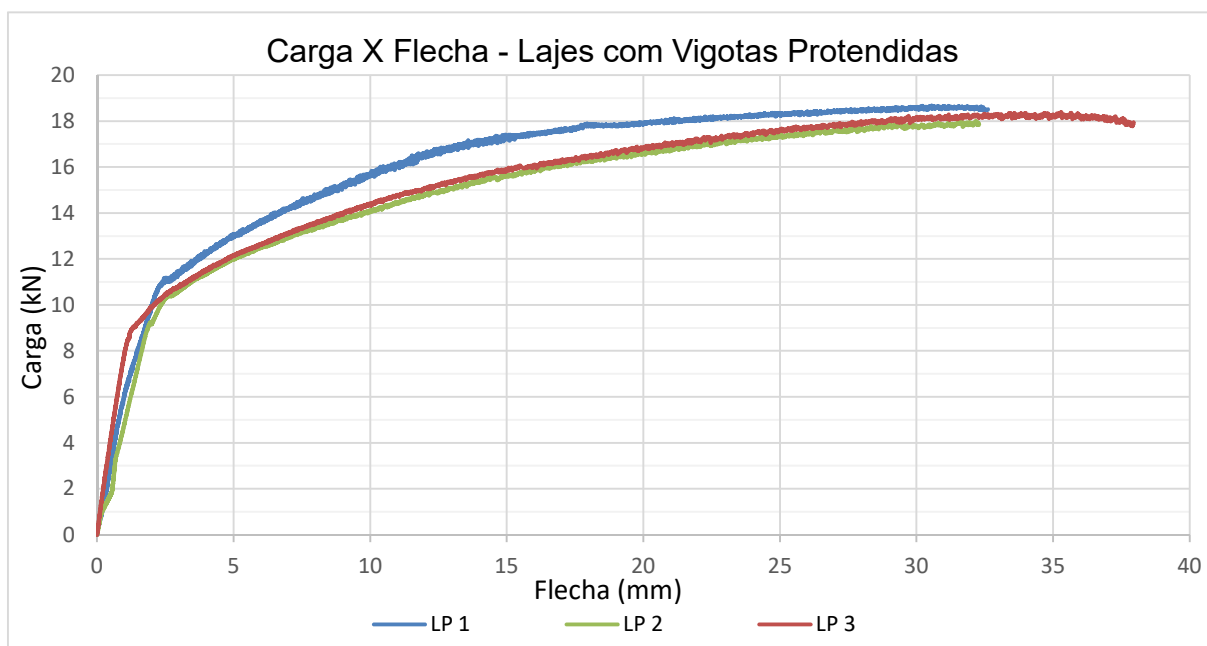
4.1.2 Ensaio de flexão dos protótipos de lajes

Do procedimento experimental realizado sobre os protótipos de lajes produzidos, pôde-se obter resultados de deslocamento vertical dos pontos extremos e central dos mesmos, e de carregamento aplicado sobre as lajes. Além dos dados experimentais obtidos, os diferentes comportamentos das lajes durante os ensaios permitiram uma avaliação comparativa entre os protótipos compostos por vigotas protendidas e compostos por vigotas treliçadas.

Quanto à apresentação dos resultados, optou-se pelos gráficos de Carga X Flecha pelo fato de que a homogeneização dos materiais da seção transversal das lajes não foi realizada. As diferenças entre as vigotas, como a classe do concreto, o tipo de aço utilizado na sua confecção e as suas dimensões transversais, são variáveis de pesquisa, que afetam diretamente a resposta da laje às solicitações, além da protensão.

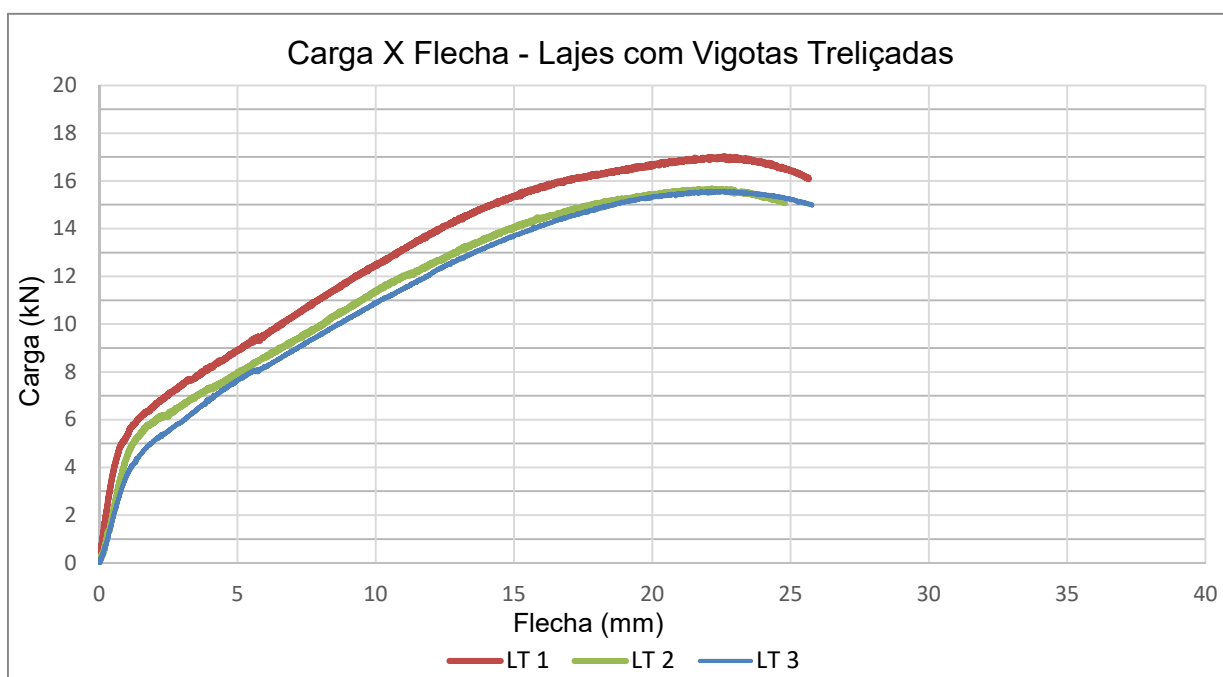
Com os valores de carregamento e de deslocamento vertical, pôde-se realizar a correlação dos mesmos, e como resultado foram obtidos os diagramas de Carga X Flecha de cada laje. Na Figura 33, pode-se observar os diagramas dos comportamentos dos protótipos com vigotas protendidas (LP1, LP2 e LP3), e na Figura 34 pode-se observar os diagramas dos protótipos com vigotas treliçadas (LT1, LT2 e LT3).

Figura 33 - Diagrama de Carga X Flecha das lajes com vigotas protendidas



Fonte: Elaboração própria

Figura 34 - Diagrama de Carga X Flecha das lajes com vigotas treliçadas

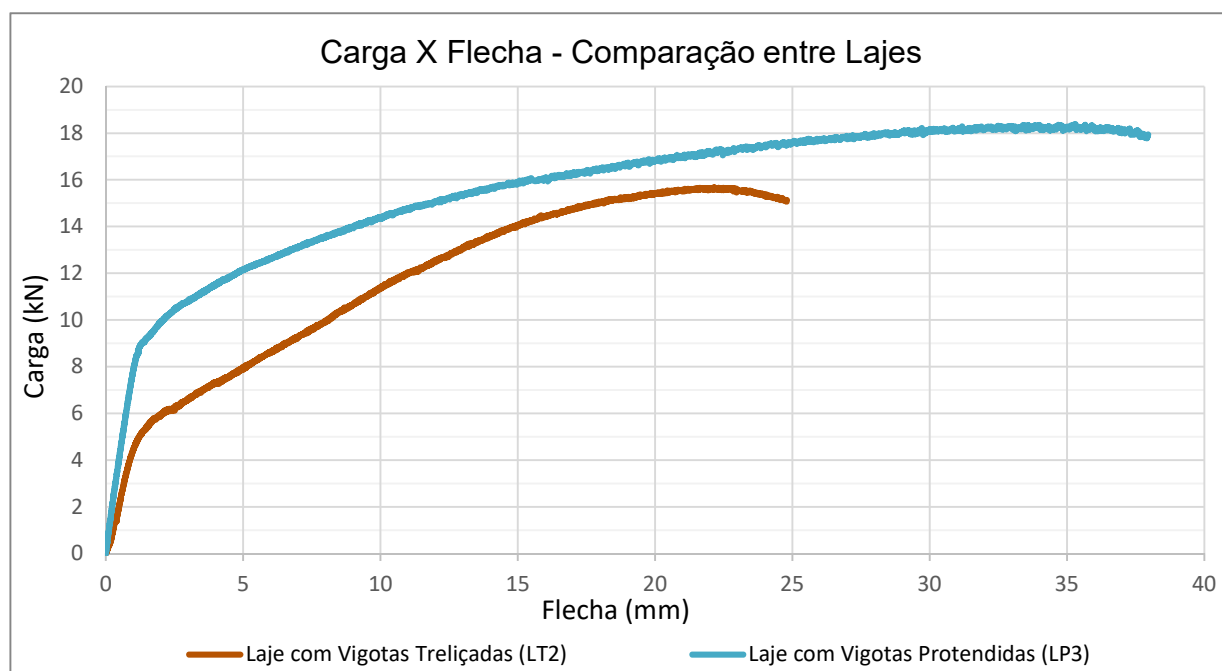


Fonte: Elaboração própria

Dos diagramas das Figuras 33 e 34 pode-se confirmar a repetibilidade do comportamento das lajes ensaiadas, com baixa variação dos valores de carregamento e flecha entre lajes com o mesmo tipo de vigota.

Para melhor análise e comparação, adotou-se os modelos LP3 e LT2 como curvas referências, por apresentarem valores mais próximos da média entre as lajes de cada tipo, e juntou-se os diagramas em uma única figura com gráfico de Carga X Flecha, conforme apresentado na Figura 35.

Figura 35 - Comparação dos diagramas de Carga X Flecha



Fonte: Elaboração própria

Da Figura 35, pode-se observar a semelhança entre o comportamento dos diagramas resultantes deste programa experimental, com os diagramas apresentados por autores de bibliografias passadas, como, por exemplo, o gráfico da Figura 8, do trabalho de Merlin *et al.*, (2005), descrito em 2.4.2.

Conforme apresentado em 3.2, alguns valores relevantes são destacados, dos resultados dos ensaios. Os valores apontados de cada laje, assim como as médias aritméticas e os desvios padrões, podem ser observados nas Tabelas 9 e 10, para as lajes com vigotas protendidas e com vigotas trelaçadas, respectivamente. Nestas tabelas, a coluna “Média” apresenta as médias aritméticas, a coluna “s” os valores de desvio-padrão e a coluna Cv os coeficientes de variação.

Tabela 9 – Valores relevantes analisados das lajes com vigotas protendidas

VALOR ANALISADO	LP1	LP2	LP3	Média	s	Cv
Carga máxima (kN)	18,68	17,99	18,40	18,36	0,34	1,87
Flecha na carga máx. (mm)	30,55	32,19	35,29	32,68	2,41	7,37
Carga na plastificação (kN)	9,57	8,86	8,41	8,95	0,58	6,54
Flecha na plastificação (mm)	1,80	1,78	1,49	1,69	0,17	10,31
Carga na Flecha Limite (kN)	14,46	13,24	13,46	13,72	0,65	4,76

Fonte: Elaboração própria

Tabela 10 – Valores relevantes analisados das lajes com vigotas treliçadas

VALOR ANALISADO	LT1	LT2	LT3	Média	s	Cv
Carga Máxima (kN)	17,04	15,69	15,59	16,10	0,51	3,18
Flecha na carga máx. (mm)	22,61	22,14	22,33	22,36	0,24	1,06
Carga na plastificação (kN)	4,65	4,37	3,76	4,26	0,46	10,68
Flecha na plastificação (mm)	0,72	0,89	0,81	0,81	0,08	10,48
Carga na Flecha Limite (kN)	10,83	9,70	9,36	9,96	0,77	7,69

Fonte: Elaboração própria

Analisando os valores de coeficientes de variação (Cv) apresentados, constata-se que em todos os casos a dispersão dos valores é relativamente baixa. Pode-se, portanto, estatisticamente afirmar que os valores médios encontrados são representativos e possuem boa repetibilidade.

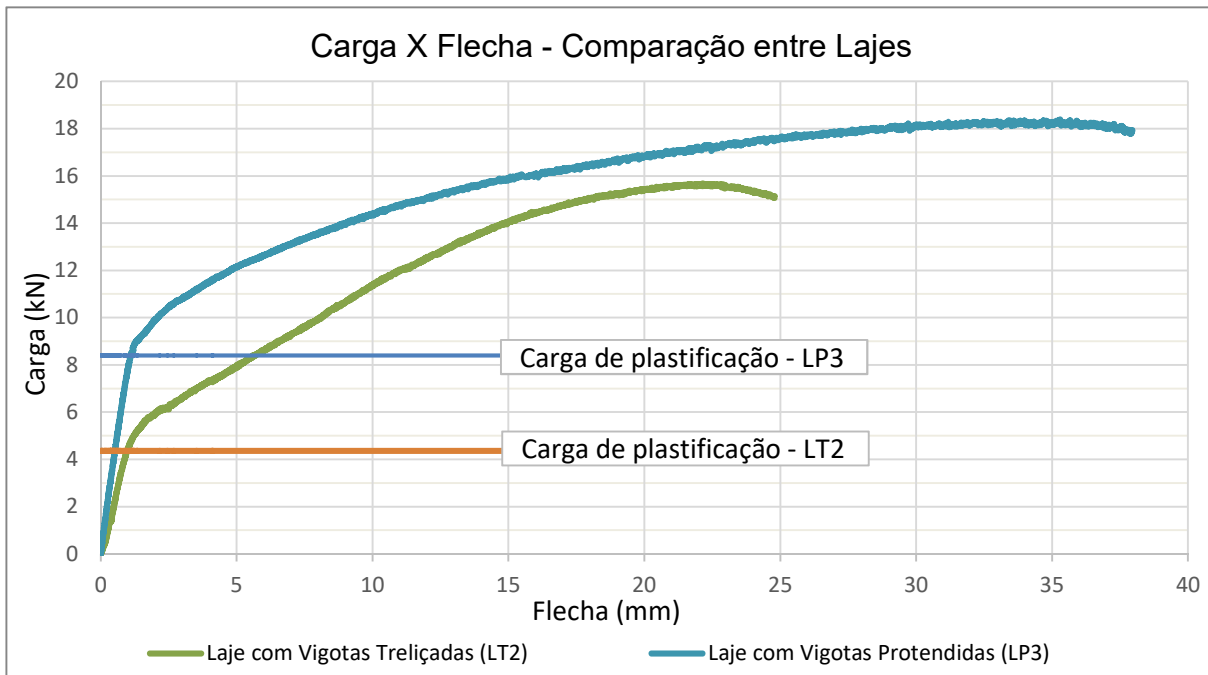
4.1.2.1 Carga limite do fim do regime elástico

Analisando valores médios aproximados de carregamentos no limite de elasticidade dos diagramas das lajes, obtiveram-se os valores de 8,95 kN para as lajes com vigotas protendidas, e de 4,26 kN para as lajes treliçadas, com os deslocamentos correspondentes de 1,61 mm e 0,90 mm, respectivamente.

A diferença entre as cargas, nesta análise, é de 110,1%, e entre os deslocamentos é de 78,9%.

Na Figura 36, podem ser observados os diagramas das lajes comparadas, com a demarcação da carga de plastificação das mesmas.

Figura 36 – Comparação de diagramas – com cargas de plastificação



Fonte: Elaboração própria

Para a análise deste comportamento, além da diferença de resistências dos concretos das vigotas, deve-se levar em consideração a diferença de propriedades e características dos aços presentes nos dois tipos de vigotas (o aço das vigotas protendidas é caracterizado pela ausência de patamar de escoamento e por possuir elevada resistência) e a influência da pré-tração existente nas armaduras das vigotas protendidas, o que impõe uma compressão inicial no concreto.

O efeito da protensão causado nas vigotas protendidas pode ser analisado nas Figuras 1, 2 e 3, que generalizam um exemplo analítico de Veríssimo e César Jr. (1998), apresentadas em 2.1. Cabe-se frisar que estes diagramas teriam comportamentos diferentes se as configurações do elemento e da protensão aplicada no exemplo fossem outras. Por exemplo, com diferentes posições da armadura de protensão, o diagrama de tensões inicial sofreria mudanças, assim como diferentes carregamentos simulados gerariam resultantes com valores e módulos possivelmente diferentes destes.

Ainda pela observação das Figuras 1, 2 e 3, pode-se ressaltar a tensão V , que é a compressão máxima inicial, na seção, a que o elemento está submetido no estado em vazio (estado em que o carregamento de serviço ainda não foi aplicado). Para que o concreto nesta seção apresente tensões de tração, deve-se aplicar uma carga,

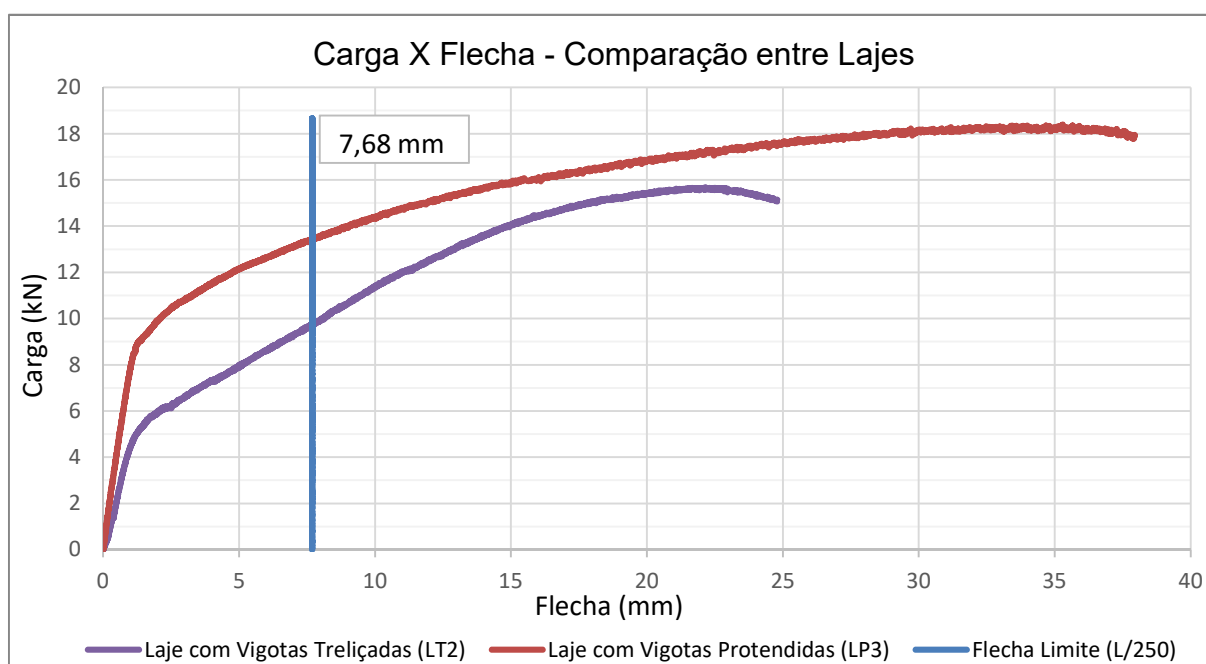
flexionando-o, que gere tensões de tração maiores que as de compressão existentes, ou seja, que realize a descompressão do concreto.

Somente após ter sido totalmente descomprimido, surgem tensões de tração na seção do elemento, que ainda continua em regime elástico até a abertura da primeira fissura, no limite de resistência do concreto à tração. Esta energia necessária para a descompressão é a principal resposta para o melhor desempenho dos elementos protendidos ensaiados neste trabalho, além das superiores propriedades dos materiais que os compõe.

4.1.2.2 Carregamento resistido na situação de Flecha Limite

Na Figura 37 (gráfico baseado na Figura 35), pode-se observar a diferença de carga resistida pelos dois tipos de laje, na situação de flecha limite definida pela NBR 6118 (ABNT, 2014), de $L/250$, que resulta no valor de 7,68 mm.

Figura 37 – Comparação de diagramas – com flecha limite normativa



Fonte: Elaboração própria

O valor médio de carga resistida pelas lajes com vigotas protendidas foi de 13,72 kN na situação de flecha limite igual a 7,68 mm, enquanto o valor médio para as lajes treliçadas foi de 9,96 kN, totalizando uma diferença de 37,7%.

O comportamento das lajes com vigotas protendidas em relação aos deslocamentos pode ser analisado tomando como base a presença de armaduras

ativas na composição da laje e a superioridade da resistência à compressão do concreto das vigotas protendidas sobre as treliçadas.

4.1.2.3 Carregamento máximo resistido

O carregamento máximo resistido pelas lajes ensaiadas também pode ser descrito como o atendimento ao Estado Limite Último (ELU), critério de segurança definido pela NBR 6118 (ABNT, 2014), que corresponde à ruína estrutural.

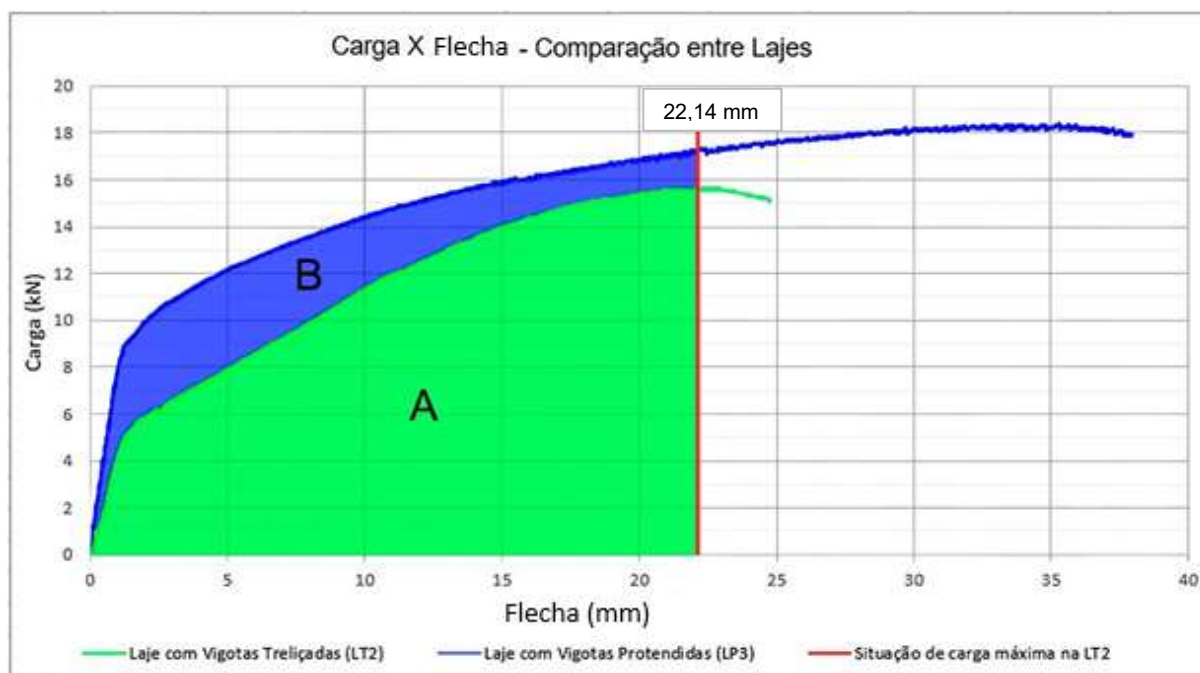
Analisando-se os valores de carga máxima resistidas pelas lajes tem-se, como valores médios, 18,36 kN para as lajes com vigotas protendidas e 16,10 kN para as lajes com vigotas treliçadas, com deslocamentos correspondentes de 34,28 mm e de 25,41 mm, respectivamente.

Este quesito de comparação se mostra favorável às lajes com vigotas protendidas, visto que as mesmas apresentam um valor de carregamento 14,0% superior às lajes treliçadas, com um deslocamento 35,0% superior nesta mesma situação.

A capacidade de suporte de maiores carregamentos máximos e deformações das vigotas protendidas se deve, principalmente, à compressão inicial imposta ao concreto pela pré-tração das armaduras, à maior resistência do concreto de sua composição e às propriedades superiores do aço de sua armadura.

Para fins de melhor comparação, pode-se analisar as áreas na Figura 38, que são demonstrações realizadas com base no gráfico da Figura 35, porém com a demarcação da carga máxima resistida pela laje treliçada (15,69 kN), no deslocamento de 22,14 mm.

Figura 38 – Áreas sob os diagramas do gráfico de comparação entre as lajes



Fonte: Elaboração própria

A área denominada “A” ilustra a integração do diagrama de Carregamento X Flecha da Laje Treliçada 2 até o momento de carga máxima resistida, ou seja, a energia de deformação absorvida pela laje até esta situação. Na área “B” tem-se o acréscimo de energia de deformação absorvido pela Laje Protendida 3 em relação à Laje Treliçada 2, até o mesmo deslocamento.

A área sob o gráfico de Carregamento X Flecha, em ensaios de flexão, representa a tenacidade do material ensaiado. Apesar de os ensaios não terem sido realizados até a ruptura completa, pela análise realizada até a situação de carga máxima resistida pela laje treliçada (no deslocamento de 22,14 mm), na Figura 38, e pelos valores de carregamento e deslocamentos, apresentados nas Tabelas 9 e 10, pode-se confirmar a maior tenacidade apresentada pelas lajes com vigotas protendidas.

Pode-se compreender facilmente a maior energia identificada no gráfico das lajes protendidas ao se considerar que, além das características físico-mecânicas dos materiais e do elemento, a descompressão do concreto previamente tensionado também exige uma parcela de demanda de energia.

4.1.2.4 Análise visual de fissuração

Como já citado, o início da fissuração do elemento demarca o fim do regime elástico do diagrama de Carga X Deslocamento do mesmo.

Notou-se, na comparação entre as lajes com vigotas protendidas e treliçadas, diferenças na fissuração das mesmas. A Figura 39 apresenta a face inferior de uma laje com vigotas protendidas, e a Figura 40, de uma laje com vigotas treliçadas.

Figura 39 – Fissuras destacadas em exemplar de laje com vigotas protendidas



Fonte: Elaboração própria

Figura 40 – Fissuras destacadas em exemplar de laje com vigotas treliçadas



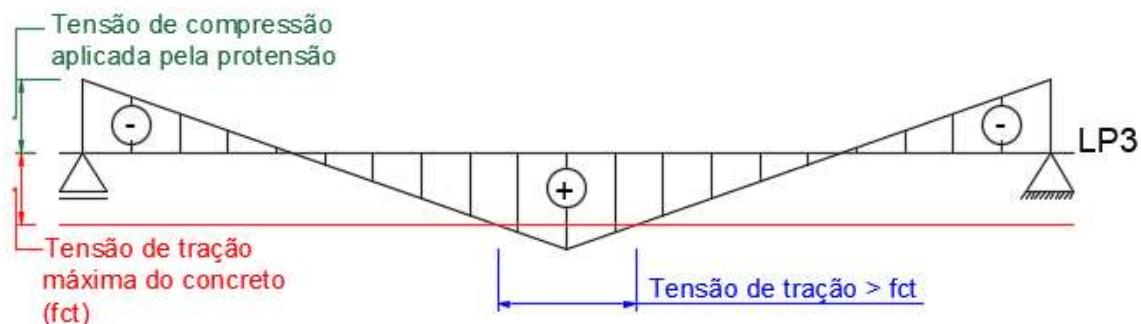
Fonte: Elaboração própria

Nota-se, nas Figuras 39 e 40, a diferença de distribuição e de quantidade de fissuras abertas na face inferior das lajes. Nas lajes com vigotas protendidas, as fissuras abertas se encontram concentradas no centro do vão, em um segmento de aproximadamente 20 cm, com 2 ou 3 fissuras somente, e com maior abertura. Já nas lajes treliçadas, o número de fissuras foi maior, e a sua distribuição ocorreu em um comprimento também maior.

Devido ao fato de que as fissuras ocorrem no instante em que o concreto atinge seu limite de resistência à tração, a resposta para a diferença de comportamento entre os dois tipos de laje pode ser encontrada ao se analisar as situações de tensões ao longo do comprimento dos elementos. A protensão aplicada nas vigotas protendidas tem influência direta sobre este comportamento.

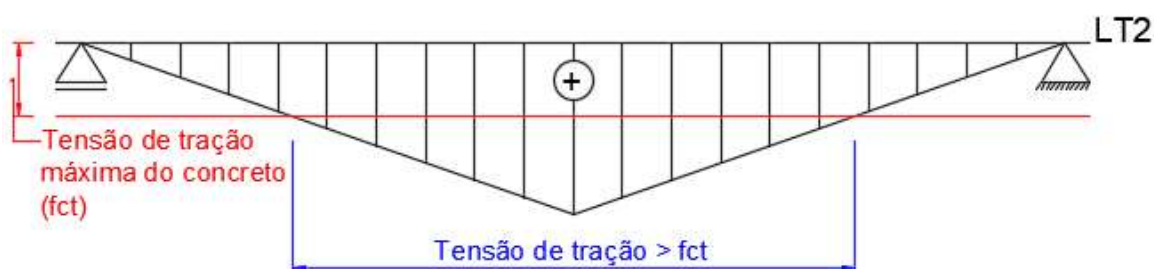
As situações de tensões normais, na parte inferior da seção das lajes, podem ser observadas nas ilustrações das Figuras 41 e 42, se referindo às lajes LP3 e LT2, respectivamente. Por conta da protensão, as lajes com vigotas protendidas possuem tensões de compressão em algumas seções, juntamente com tensões de tração, o que caracteriza a protensão parcial, como discorrido em 2.1, com o concreto atingindo o limite de resistência à tração nas seções mais solicitadas.

Figura 41 – Situação de tensões normais em laje com vigotas protendidas



Fonte: Elaboração própria

Figura 42 – Situação de tensões normais em laje com vigotas treliçadas



Fonte: Elaboração própria

Nas lajes treliçadas (com exemplar ilustrado na Figura 41), desde o instante de início do carregamento, o momento positivo gera tensões de tração por todo o comprimento das mesmas, com uma maior incidência no ponto central do vão (momento máximo). Quando estas tensões atingem o limite de resistência à tração do concreto (que nas lajes treliçadas apresenta um valor inferior ao das lajes com vigotas protendidas), as fissuras surgem, em uma região que se estende do centro do vão e vai em direção aos apoios, simetricamente, onde o diagrama de tensões possui maiores valores de tração.

Nas lajes com vigotas protendidas, como ilustrado na Figura 42, apesar de o diagrama de momento fletor causado pelo carregamento ser o mesmo das lajes treliçadas, a situação das tensões na parte inferior da laje é outra. A protensão inicial aplicada ao elemento, exige uma parcela de carregamento (na flexão) para que se atinja a total descompressão do concreto. Como a seção central do vão é onde as tensões normais de tração, causadas pela flexão, são mais elevadas, este é o primeiro ponto a atingir o estado de descompressão e iniciar o regime de tração no elemento.

Devido ao fato de que a protensão dos elementos pré-moldados utilizados se transfere do aço para o concreto por aderência, pode-se considerar que por todo o

comprimento da vigota, a compressão inicial do concreto é a mesma. Levando-se em conta a variação longitudinal das tensões de tração com o diagrama de momento fletor pelo comprimento do elemento, chega-se à observação de que, em determinado instante de aplicação do carregamento da flexão, alguns pontos do elemento estarão sob tensões de tração, enquanto outros ainda não foram tampouco totalmente descomprimidos.

Partindo desta análise, o concreto da região central do vão atinge o seu limite de resistência à tração antes das demais seções, e conseqüentemente é onde se encontram as primeiras fissuras. Após a abertura destas fissuras, as tensões de tração não são mais transmitidas pelo concreto ao longo de todo comprimento do elemento, conseqüentemente mantendo as demais seções transversais com o concreto sem atingir o seu limite de resistência à tração, e na maioria delas, ainda sob tensões de compressão.

As poucas e primeiras fissuras surgidas na região central das lajes com vigotas protendidas, dissipam a maior parte da energia de deformação originada pelo deslocamento da laje, resultando em maiores aberturas, quando comparadas com as lajes treliçadas, como pode ser observado na Figura 43, durante um dos ensaios sobre uma laje com vigotas protendidas.

Figura 43 – Fissuração durante um ensaio de lajes com vigotas protendidas



Fonte: Elaboração própria

4.2 Quanto ao estudo de Custos

Partindo das duas composições de serviços analisadas, pode-se notar que estas possuem os mesmos insumos e serviços, exceto pelo escoramento considerado nas lajes treliçadas. Para fim de comparação direta entre as composições, os materiais e insumos referentes ao escoramento na composição de lajes protendidas foram considerados com coeficiente 0. A comparação, com as descrições simplificadas, pode ser observada na Tabela 11.

Tabela 11 - Comparação de coeficientes das composições

DESCRIÇÃO	UNID.	COEFICIENTES	
		Protendidas	Treliçadas
Carpinteiro de formas	H	0,139	0,574
Servente	H	0,098	0,406
Laje pré-moldada com lajota cerâmica, unidirecional	m ²	1,117	1,117
Concretagem para lajes pré-moldadas, fck = 20 MPa	m ³	0,045	0,054
Fabricação de escoras do tipo pontalete, em madeira	M	0,000	0,970
Tábua de madeira 2,5 x 20 cm não aparelhada	M	0,000	1,870
Prego de aço polido com cabeça dupla 17 x 27	Kg	0,000	0,040

Fonte: Elaboração própria

Buscando uma análise comparativa, pôde-se obter as proporções, em porcentagem, que a execução de lajes treliçadas é mais cara que a de lajes protendidas, para cada serviço especificado. Estes valores podem ser analisados na Tabela 12, na coluna "PROPORÇÃO".

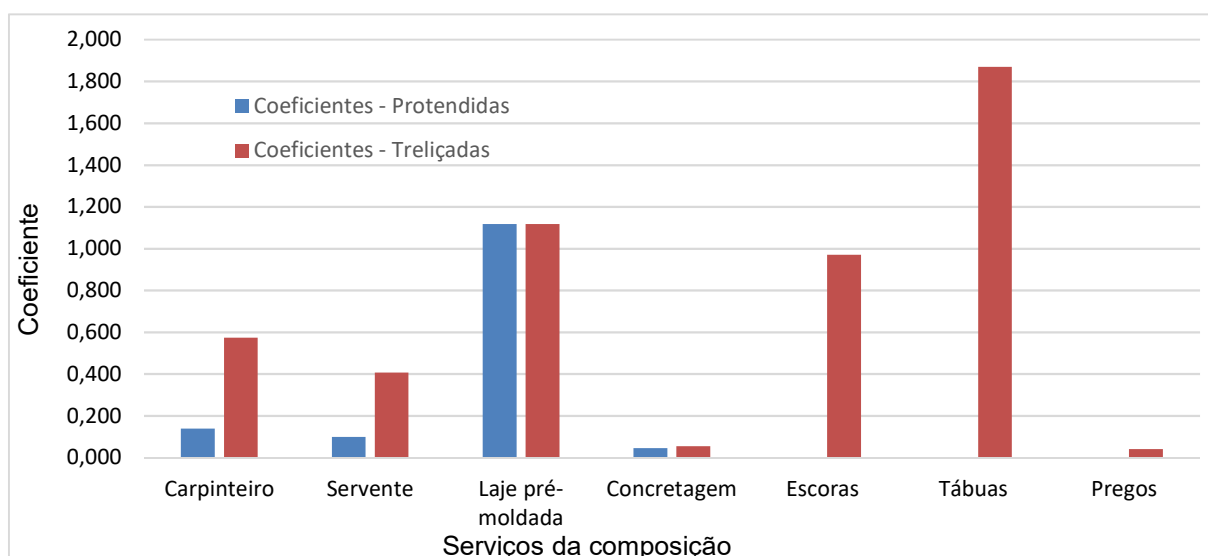
Tabela 12 - Proporções em que os serviços das lajes treliçadas são mais caros que os de lajes protendidas

DESCRIÇÃO	PROPORÇÃO
Carpinteiro de formas	75,78%
Servente	75,86%
Laje pré-moldada com lajota cerâmica, unidirecional	0,00%
Concretagem para lajes pré-moldadas, fck = 20 MPa	16,67%
Fabricação de escoras do tipo pontalete, em madeira	100,00%
Tábua de madeira 2,5 x 20 cm não aparelhada	100,00%
Prego de aço polido com cabeça dupla 17 x 27	100,00%

Fonte: Elaboração própria

Para uma análise mais clara, pode-se observar na Figura 44 o gráfico comparativo entre os coeficientes dos serviços.

Figura 44 - Gráfico comparativo entre coeficientes dos serviços



Fonte: Elaboração própria

Pela análise da Figura 44, fica evidente a superioridade do custo dos serviços referentes à execução de lajes com vigotas treliçadas.

O fato de as vigotas protendidas dispensarem o uso de escoras em vãos pequenos é de grande relevância nesta análise. Quando os serviços são o objeto em pauta, as etapas de montagem de escoras, colocação de tábuas e a posterior remoção das mesmas, possuem uma influência significativa na composição geral de execução da laje, como fica evidente no gráfico da Figura 44, onde os coeficientes destes serviços estão entre os mais elevados da composição.

Quanto à comparação de custos entre as lajes, por metro quadrado e entre os dois tipos de vigota linearmente, após o levantamento de preços, pôde-se chegar à relação do Fabricante A e do Fabricante B apresentados na Tabela 13, além da média de preços obtida no levantamento.

Tabela 13 - Resultado da pesquisa de custos no mercado regional

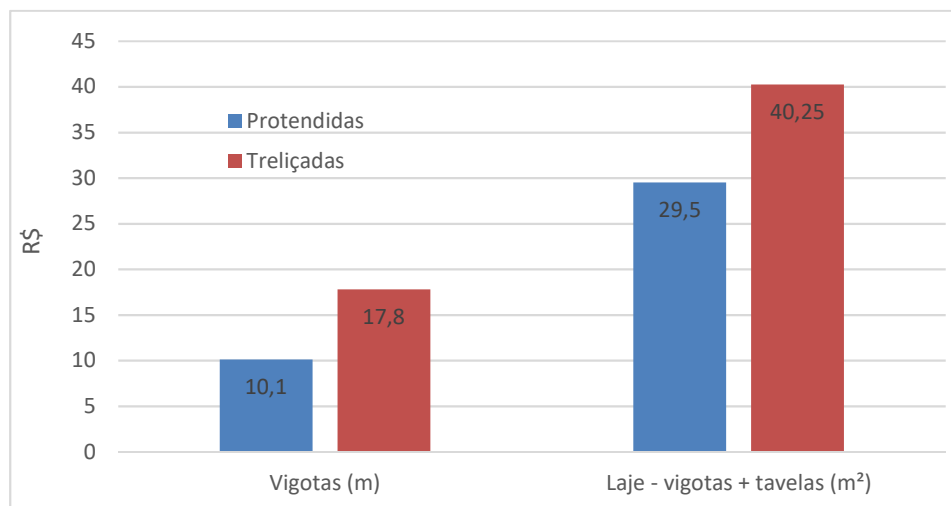
Composição	Un.	Fabricante A	Fabricante B	Média
Vigotas Protendidas	R\$/m	10,5	11	10,75
Vigotas Treliçadas	R\$/m	20	19	19,5
Vigotas protendidas + tabelas	R\$/m ²	28	27	27,5
Vigotas treliçadas + tabelas	R\$/m ²	36	35	35,5

Fonte: Elaboração própria

Analisando a média de preços entre os fabricantes, aponta-se que para a consideração feita por metro linear, as vigotas treliçadas representam um custo 81% maior em relação às vigotas protendidas. Na análise por metro quadrado de laje, com

vigotas e telhas cerâmicas, as lajes com vigotas treliçadas apresentaram um custo 29% maior que as com vigotas protendidas. A comparação gráfica entre as médias pode ser visualizada na Figura 45.

Figura 45 - Comparação entre média de custos



Fonte: Elaboração própria

Portanto, pela análise dos resultados obtidos da pesquisa de custos, fica evidente a superioridade nos preços referentes às vigotas treliçadas, tanto de serviços quanto de materiais componentes das lajes pré-moldadas.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Dos objetivos do trabalho, todos foram alcançados e cumpridos, desde a realização do procedimento experimental, com resultados de boa repetibilidade, ao estudo de custos e a comparação direta entre as lajes, em termos, estruturais, de custos e construtivos.

Partindo da discussão realizada sobre os dois tipos de vigotas abordados, fica evidente que o uso vigotas protendidas apresentam vantagens. Tanto no procedimento experimental, quanto na análise de custos, as lajes com elementos protendidos se sobressaíram em todos os quesitos analisados.

No procedimento experimental, as lajes com vigotas protendidas apresentaram, em média, resistência a **110,1%** mais carga que as lajes treliçadas, até a abertura da primeira fissura, o que proporciona maior garantia de proteção às armaduras. Na situação de flecha limite, delimitada pela NBR 6118 (ABNT, 2014), as lajes com vigotas protendidas suportaram **37,7%** mais carga que as lajes treliçadas, e como carga máxima suportada, apresentaram resultados de **14,0%** mais carga resistida.

A maior energia de deformação absorvida pelas vigotas protendidas, desprendida para a descompressão do concreto, proporciona uma melhor relação custo-benefício ao emprego destes elementos em lajes pré-fabricadas, pois facilitam o atendimento aos estados limites de serviço e último. Dadas as proporções dos resultados experimentais, e levando-se em conta as iguais características dos protótipos, pode-se considerar possibilidades de redução de custos das lajes com vigotas protendidas, como a diminuição da espessura da capa de concreto e a utilização de tabelas mais largas (menos vigotas por metro quadrado), além da possibilidade de aumento dos vãos livres estruturais.

Para as configurações de ensaios realizadas, as lajes com vigotas protendidas apresentaram menores custos construtivos e de material. A redução do cimbramento necessário, faz com que os custos de serviços das composições deste tipo de laje sejam menores do que os referentes às lajes treliçadas.

Ainda, no mercado regional, o custo dos insumos diretos deste tipo de laje se mostrou também inferior ao de lajes treliçadas. Para vigotas compradas separadamente, por metro linear, os elementos com protensão apresentaram custo **81%** inferior ao apresentado pelos treliçados. Quanto ao custo por metro quadrado de

laje pré-moldada (vigotas e tabelas), as lajes compostas por vigotas protendidas se mostraram **29%** mais baratas.

5.1 Recomendações para trabalhos futuros

Ao decorrer deste trabalho, deparou-se com variações de ensaio que possibilitariam a obtenção de novos dados para a análise, podendo acrescentar às conclusões obtidas. Algumas sugestões são:

- Realizar a medição e análise da abertura de fissuras, comparando vigotas treliçadas e protendidas, de forma a avaliar se as maiores aberturas da fissuração nas vigotas protendidas não as tornam desvantajosas, levando-se em conta o atendimento ao estado limite de serviço e o limite de abertura de fissuras para estes elementos;
- Reproduzir os ensaios do procedimento experimental deste trabalho com vãos maiores e variados, avaliando a proporção da diferença de desempenhos apresentados com cada acréscimo, relacionando-os.
- Aplicar a mesma análise deste procedimento experimental, sobre lajes com vigotas treliçadas que possuam fios protendidos na sua composição, avaliando a combinação da treliça com a protensão.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7483**: Cordoalhas de aço para concreto protendido. Rio de Janeiro, 2008.

_____. **NBR 7482**: Fios de aço para estruturas de concreto protendido. Rio de Janeiro, 2008.

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

_____. **NBR 14859-1**: Lajes pré-fabricada de concreto parte 1: vigotas, minipanéis e painéis: requisitos. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 14859-3**: Lajes pré-fabricadas de concreto parte 3: armadura treliçadas eletrossoldadas para lajes pré-fabricadas: requisitos. Rio de Janeiro, 2017.

_____. **NBR 9062**: Projeto e execução de estruturas de concreto pré moldado. Rio de Janeiro, 2017.

ALBUQUERQUE, Augusto Teixeira de; MOTA, Joaquim Eduardo; CARACAS, J.; NOBRE, Ednardo Guimarães. Lajes treliçadas protendidas (pré-tração). In: ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA-PROJETO-PRODUÇÃO EM CONCRETO PRÉ-MOLDADO, 1., 2005, São Carlos. **Anais...** São Carlos: EESC/USP-Depo. de Eng. de Estruturas, 2005.

BARBIERI, Paola. **Análise teórica e experimental de lajes treliçadas**. Santa Cruz do Sul, 2016.

BOCCHI JÚNIOR, Carlos Fernando. **Lajes Nervuradas de Concreto Armado: Projeto e Execução**. São Carlos, 1995.

CARVALHO, Roberto Chust; FIGUEIREDO FILHO, Jacson Rodrigues de. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado**: segundo a NBR 6618/2003. 4ª edição. São Carlos: Edufscar, 2004.

DELLATORRE, Emanuel Antônio. **Reforço de vigas de concreto armado submetidas à flexão com compósito contendo fibras de juta**. Alegrete, 2015.

DINIZ, Siria Maria da Silva; VARGAS, Alexandre. **Avaliação experimental da influência da treliça eletrosoldada na flecha de vigotas pré-moldadas**. Criciúma, 2016.

DROPPA JÚNIOR, Alonso. **Análise estrutural de lajes formadas por elementos pré-moldados tipo vigota com armação treliçada**. São Carlos, 1999.

FERREIRA, Tobias Ribeiro. **Otimização estrutural de lajes formadas por vigotas treliçadas com e sem protensão**. Uberlândia, 2017.

GRANDO, Diandra Torteli; VARGAS, Alexandre. **Avaliação experimental da influência da treliça eletrosoldada no deslocamento vertical em vigotas de laje pré-fabricadas dimensionadas como seção T**. Criciúma, 2018.

HANAI, João Bento de. **Fundamentos do Concreto Protendido**. São Carlos, SP: USP - Escola de Engenharia de São Carlos, 2005.

MENEGON, Franci; VARGAS, Alexandre. **Análise experimental comparativa entre lajes com vigota treliçada e comum**. Criciúma, 2018.

MERLIN, Andrei José. **Momentos fletores negativos nos apoios de lajes formadas por vigotas de concreto protendido**. São Carlos, 2002.

MERLIN, Andrei José; EL DEBS, Mounir Khalil; TAKEYA, Toshiaki; MARCOS NETO, Noé. Análise do efeito da protensão em lajes pré-moldadas com armação treliçada. In: ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA PROJETO PRODUÇÃO EM CONCRETO PRÉ-MOLDADO, 1, 2005, São Carlos. **Anais...** São Carlos: EESC/USP-Depto. de Eng. de Estruturas, 2005.

NAKAO, Ricardo; CORREA, Elizete Da Paz; ROCHA, Fatner Penze; SILVA, Jucimeire Neves; CARDOSO, Caio Saravi; CASTRO JUNIOR, Nelson. Lajes pré-fabricadas treliçadas: uma análise experimental regional segundo a NBR 14859 In: ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA-PROJETO-PRODUÇÃO EM CONCRETO PRÉ-MOLDADO, 1, 2005, São Carlos. **Anais...** São Carlos: EESC/USP, 2005.

PISONI, Felipe Uglioni; VARGAS, Alexandre. **Análise experimental da capacidade portante de vigotas treliçadas e protendidas utilizadas em lajes pré fabricadas usuais**. Criciúma, 2016.

VERÍSSIMO, Gustavo de Souza; CÉSAR JR, Kléos M. Lenz. **Concreto Protendido: Fundamentos Básicos**. 4ª edição. Viçosa, MG: [s.n.], 1998..

ZIMERMANN, Amanda Besen. **Estudo de caso: uma análise técnico-financeira do uso de vigotas protendidas de concreto em substituição às vigotas pré-moldadas convencionais**. Palhoça, 2018.