

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

DOUGLAS RIBEIRO DAMASCENO

Análise Experimental de Lajes Nervuradas Pré-moldadas Trelaçadas

Uberlândia
2022

DOUGLAS RIBEIRO DAMASCENO

Análise Experimental de Lajes Nervuradas Pré-moldadas Trelaçadas

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Civil da UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA, como requisito parcial para a Obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Gustavo Delalibera

Uberlândia
2022

DOUGLAS RIBEIRO DAMASCENO

Análise Experimental de Lajes Nervuradas Pré-moldadas Trelaçadas

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Civil da UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA, como requisito parcial para a Obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Uberlândia, 04 de agosto de 2022

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Rodrigo Gustavo Delalibera
Universidade Federal de Uberlândia

Prof. Dr. Antônio Carlos dos Santos
Universidade Federal de Uberlândia

Prof. Dr. Arquimedes Diógenes Ciloni
Universidade Federal de Uberlândia

Dedico este trabalho aos meus familiares, especialmente meus pais, irmãos e amigos da graduação que sempre me incentivaram durante essa jornada.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a minha família, pais e irmãos que sempre me incentivaram e deram suporte durante toda minha formação acadêmica;

Aos meus amigos de faculdade, em especial Alisson Garcez, Alexandre Marques, Guilherme Vieira e Gustavo Henrique por se tornarem pessoas que pretendo levar comigo para vida toda;

Ao professor Dr. Rodrigo Gustavo Delalibera, pela orientação e ensinamentos durante este trabalho;

Ao Laboratório de Estruturas da UFU e aos amigos Igor Vargas e Alex Sandro, pelo suporte durante os ensaios de laboratório;

Enfim, a todos que ajudaram direta e indiretamente que levaram a conclusão deste trabalho.

RESUMO

De maneira geral, o trabalho pretende analisar experimentalmente lajes nervuradas pré-moldadas treliçadas. Assim, serão feitas revisões bibliográficas sobre o assunto, utilizando normas e estudos prévios, além de ensaios em laboratório. Para tal, será apresentado um estudo comparativo de seis lajes com diferentes tipos de armadura, tais como: carga uniformemente distribuída aplicada sobre uma vigota, entre duas vigotas, e sobre o elemento de enchimento (EPS), com e sem tela na mesa. Com isso, será demonstrado a influência da armadura de distribuição nas verificações dos Estados Limites de Serviço e Último. Por fim, chegou-se a conclusão que a tela possui maior influência na laje que apresenta duas vigotas justapostas, principalmente em sua capacidade de suporte.

Palavras-chave: Lajes; Tela; Capacidade de suporte.

ABSTRACT

In general, the work intends to experimentally analyze precast lattice-reinforced ribbed slabs. Thus, literature reviews will be made on the subject, using standards and previous studies, in addition to laboratory tests. For this, a comparative study of six slabs with different types of reinforcement will be presented, such as: uniformly distributed load applied on a joist, between two joists, and on the filler element (EPS), with and without mesh on the table. With this, the influence of the distribution reinforcement in the Serviceability Limit State and Ultimate Limit State verifications will be demonstrated. Finally, it was concluded that the mesh has greater influence on the slab that has two joists juxtaposed, especially in its bearing capacity.

Keywords: Slabs; Mesh; Bearing capacity.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 — Vigotas pré-fabricadas	20
Figura 2 — Elementos constituintes: laje pré-moldada treliçada	21
Figura 3 — Laje pré-moldada treliçada unidirecional	22
Figura 4 — Laje pré-moldada treliçada bidirecional	23
Figura 5 — Laje 1ST: sem tela na mesa (cotas em cm)	26
Figura 6 — Laje 2ST: sem tela na mesa (cotas em cm)	27
Figura 7 — Laje 3ST: sem tela na mesa (cotas em cm)	27
Figura 8 — Laje 1CT: com tela na mesa (cotas em cm)	28
Figura 9 — Laje 2CT: com tela na mesa (cotas em cm)	28
Figura 10 — Laje 3CT: com tela na mesa (cotas em cm)	28
Figura 11 — Extensômetro colado	30
Figura 12 — Aparelho de ensaios EMIC	32
Figura 13 — Blocos de concreto maciço	37
Figura 14 — Esquema de ensaio	37
Figura 15 — Posicionamento lateral dos transdutores	38
Figura 16 — Posicionamento transdutor central	38
Figura 17 — Vista lateral da laje durante carregamento	39
Figura 18 — Altura útil - 3ST (cotas em cm)	48
Figura 19 — Laje 3ST - Ruptura	50
Figura 20 — Altura útil - 3CT (cotas em cm)	51
Figura 21 — Laje 3CT - Ruptura	52

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 —	23
Equação 2 —	23
Equação 3 —	24
Equação 4 —	24
Equação 5 —	24
Equação 6 —	33
Equação 7 —	34
Equação 8 —	34
Equação 9 —	35
Equação 10 —	35
Equação 11 —	36
Equação 12 —	36
Equação 13 —	46
Equação 14 —	46
Equação 15 —	46
Equação 16 —	46
Equação 17 —	47
Equação 18 —	47
Equação 19 —	47
Equação 20 —	48
Equação 21 —	48
Equação 22 —	48
Equação 23 —	48
Equação 24 —	49
Equação 25 —	49
Equação 26 —	49
Equação 27 —	49
Equação 28 —	49
Equação 29 —	50
Equação 30 —	50
Equação 31 —	51
Equação 32 —	51
Equação 33 —	51
Equação 34 —	51
Equação 35 —	52
Equação 36 —	52
Equação 37 —	57

Equação 38 —	57
--------------------	----

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 — Força x Largura fissuras - Lajes 1ST e 1CT	39
Gráfico 2 — Força x Largura fissuras - Lajes 2ST e 2CT	40
Gráfico 3 — Força x Largura fissuras - Lajes 3ST e 3CT	40
Gráfico 4 — Força x Deslocamento (Lajes 1ST e 1CT)	42
Gráfico 5 — Força x Deslocamento (Lajes 1ST e 1CT) (detalhado)	43
Gráfico 6 — Força x Deslocamento (Lajes 2ST e 2CT)	43
Gráfico 7 — Força x Deslocamento (Lajes 2ST e 2CT) (detalhado)	44
Gráfico 8 — Força x Deslocamento (Lajes 3ST e 3CT)	45
Gráfico 9 — Força x Deslocamento (Lajes 3ST e 3CT) (detalhado)	45
Gráfico 10 — Força x Deformação (Laje 1CT)	53
Gráfico 11 — Força x Deformação (Laje 1ST)	54
Gráfico 12 — Força x Deformação (Laje 2CT)	54
Gráfico 13 — Força x Deformação (Laje 2ST)	55
Gráfico 14 — Força x Deformação (Laje 3CT)	56
Gráfico 15 — Força x Deformação (Laje 3ST)	57
Gráfico 16 — Força x Deformação (Laje 1ST) (detalhado)	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 —	Espessura das capas de concreto	29
Tabela 2 —	Resistência à compressão do concreto	32
Tabela 3 —	Valores de força máxima	33
Tabela 4 —	Medidas de diâmetro e comprimento dos CP's	33
Tabela 5 —	Resistência à tração do concreto	34
Tabela 6 —	Módulo de elasticidade do concreto	34
Tabela 7 —	Valores de tensão máxima do aço	35
Tabela 8 —	Valores de peso e comprimento das amostras	35
Tabela 9 —	Tensão de ruptura e alongamento do aço	36
Tabela 10 —	Carga de ruptura	40
Tabela 11 —	Tensões de cisalhamento solicitante	47

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CP	Corpo de prova
E_c	Módulo de elasticidade
ELS	Estado Limite de Serviço
ELU	Estado Limite Último
EPS	Poliestireno Expandido
f_{st}	Tensão de ruptura do aço
LVDT	Linear Variable Differential Transformer
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso

LISTA DE SÍMBOLOS E UNIDADES

cm	Centímetro
cm ³	Centímetro cúbico
g	Grama
GPa	Gigapascal
kgf	Quilograma-força
kN	Quilonewton
mm	Milímetro
MPa	Megapascal
N	Newton
Ø	Diâmetro

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVOS	15
1.1.1	Objetivo Geral	15
1.1.2	Objetivo Específico	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	CONCRETO ARMADO	17
2.1.1	Conceito	17
2.1.2	Elementos constituintes	18
2.2	LAJES NERVURADAS	19
2.2.1	Conceito	19
2.2.2	Lajes nervuradas pré-moldadas	19
2.2.3	Lajes nervuradas pré-moldadas treliçadas	20
2.2.3.1	Caracterização	20
2.2.3.2	Lajes unidirecionais	21
2.2.3.3	Lajes bidirecionais	22
2.2.4	Verificações de cisalhamento	23
2.2.5	Prescrições da ABNT NBR 6118:2014	24
3	ANÁLISE ANALÍTICA DAS LAJES ENSAIADAS	26
4	ANÁLISE EXPERIMENTAL	30
4.1	INSTRUMENTAÇÕES	30
4.2	MATERIAIS E EQUIPAMENTOS UTILIZADOS	31
4.3	PROCEDIMENTOS DE ENSAIO	31
4.3.1	Resistência à compressão do concreto	32
4.3.2	Resistência à tração do concreto	32
4.3.3	Módulo de elasticidade do concreto	34
4.3.4	Resistência do aço	34
4.3.5	ENSAIO DAS LAJES	36
5	ANÁLISE DOS RESULTADOS	42
5.1	DESLOCAMENTO VERTICAL	42
5.2	RUPTURA	46
5.3	DEFORMAÇÃO	52
6	CONCLUSÃO	59
	REFERÊNCIAS	60
	ANEXO A — FOTOS RUPTURA	61

1 INTRODUÇÃO

As lajes nervuradas são muito utilizadas nas construções atuais. Em razão da eliminação do concreto abaixo da linha neutra, apresentam uma grande vantagem em relação as lajes maciças: vencer grandes vãos. Segundo Gerhard (2016), "atualmente é comum encontrar projetos contendo grandes vãos, fator que torna economicamente inviável a utilização de lajes maciças de concreto, fazendo com que a utilização de lajes nervuradas assumam grande representação na construção civil atual, dentre os sistemas de lajes nervuradas destaca-se cada vez mais as lajes pré-moldadas treliçadas". Desta forma, muitos engenheiros optam por usá-las em seus projetos, não apenas em grandes construções, mas também em edificações de menor porte.

Atualmente, as empresas investem em novas técnicas tentando reduzir os desperdícios e os custos que envolvem a construção do empreendimento. Isso aplicado ao sistema de lajes torna imprescindível um estudo mais detalhado da estrutura que será utilizada, pois dependendo da redução dos materiais empregados e da quantidade de pavimentos poderá proporcionar vantagens econômicas e financeiras consideráveis, sendo não somente pelo lado da economia de materiais, mas também pela rapidez do método construtivo (ARAÚJO, 2008).

Segundo Franca e Fusco (1997), "as lajes nervuradas são as que têm sua resistência à tração concentrada apenas nas nervuras, entre as quais eventualmente podem ser colocados materiais não estruturais, de modo a tornar plana a superfície inferior da peça".

As lajes nervuradas são divididas em moldadas in loco e pré-moldadas. As pré-moldadas, que são o foco deste trabalho, são constituídas por vigotas pré-fabricadas, capazes de suportar as cargas atuantes, o elemento de enchimento, geralmente lajotas ou E.P.S. e, geralmente com a presença da armadura de distribuição localizada na mesa. O presente trabalho aborda uma análise experimental com esse tipo de laje. Assim, serão feitos ensaios em laboratório para constatar a importância da armadura de distribuição (tela) nesse elemento estrutural.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Analisar experimentalmente o comportamento das diferentes configurações das lajes nervuradas com vigotas treliçadas, através das verificações de ELS e ELU.

1.1.2 Objetivo Específico

- Comparar os resultados experimentais das diferentes formas de lajes;
- Avaliar a importância da tela nas lajes nervuradas com vigotas pré-moldadas treliçadas nas verificações de ELS e ELU;
- Analisar a ruptura das lajes.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CONCRETO ARMADO

2.1.1 Conceito

O concreto é um material artificial muito utilizado no mundo todo, proveniente da mistura de aglomerantes¹, agregados² e água. Segundo Neville (2012), "o concreto é qualquer produto ou massa produzido a partir do uso de um meio cimentante. Geralmente esse meio é o produto da reação entre um cimento hidráulico e água, mas atualmente mesmo essa definição pode cobrir uma larga gama de produtos, podendo ser produzido com vários tipos de cimentos e também conter pozolanas, como cinza volante, escória de alto-forno, sílica ativa, adições minerais, agregados de concreto reciclado, aditivos, polímeros e fibras".

O concreto, como as pedras naturais, apresenta alta resistência à compressão, o que faz dele um excelente material para ser empregado em elementos estruturais primariamente submetidos à compressão, como por exemplo os pilares, mas, por outro lado, suas características de fragilidade³ e baixa resistência à tração restringem seu uso isolado em elementos submetidos totalmente ou parcialmente à tração, como tirantes⁴, vigas, lajes e outros elementos fletidos. Para contornar essas limitações, o aço é empregado em conjunto com o concreto, e convenientemente posicionado na peça de modo a resistir às tensões de tração (Bastos, 2019).

Desta forma, segundo Bastos (2019) "o concreto armado alia as qualidades do concreto (baixo custo, durabilidade, boa resistência à compressão, ao fogo e à água) com as do aço (ductilidade⁵ e excelente resistência à tração e à compressão), o que permite construir elementos com as mais variadas formas e volumes, com relativa rapidez e facilidade, para os mais variados tipos de obra".

Além disso, é imprescindível que haja aderência entre esses dois elementos. Assim, para Pinheiro (2007), o "concreto armado é a associação do concreto simples com uma armadura, usualmente constituída por barras de aço. Porém, esses dois materiais devem resistir solidariamente aos esforços solicitantes. Essa solidariedade é garantida pela aderência entre os mesmos".

1 Possui a finalidade de aglomerar outros materiais. No concreto, o cimento Portland é mais utilizado.

2 Materiais granulares, geralmente inertes.

3 Característica de materiais que não possuem fase plástica e sofrem ruptura ao final da fase elástica.

4 Elementos exclusivamente tracionados.

5 Característica de materiais que admitem grandes deformações antes da sua ruptura.

2.1.2 Elementos constituintes

Segundo Bastos (2006), nas construções de concreto armado, sejam elas de pequeno ou grande porte, três elementos estruturais são bastante comuns: lajes, vigas e pilares, o que leva a serem considerados os elementos estruturais mais importantes. Outros elementos que podem não estar presentes em todas as construções, são: sapatas e blocos de fundação, tubulões, tirantes, dentre outros.

De acordo com a NBR 6118 (2014), os elementos estruturais são classificados conforme sua forma geométrica e função estrutural, podendo ser linear, bidimensional ou tridimensional. Os elementos lineares são aqueles que o comprimento longitudinal supera em pelo menos três vezes a maior dimensão transversal, também chamados de barras. Por outro lado, os elementos bidimensionais são aqueles em que a espessura é relativamente pequena em face das demais. E por fim, Bastos (2006) afirma que os elementos tridimensionais possuem as três dimensões da mesma ordem de grandeza, como blocos e sapatas de fundação.

Os pilares são responsáveis por receber as cargas, comumente de vigas ou lajes, e transmitir para a fundação. A NBR 6118 (2014), afirma que "são elementos lineares de eixo reto, usualmente dispostos na vertical, em que as forças de compressão são preponderantes". Além disso, segundo Bastos (2019) podem ser considerados o elemento de maior importância nas estruturas, tanto do ponto de vista da capacidade resistente da edificação quanto no aspecto da segurança, sendo o principal responsável na estabilidade global dos edifícios ao compor o sistema de contraventamento juntamente com as vigas e lajes.

As vigas são elementos lineares (barras) onde a flexão é preponderante. Sua função básica é vencer vãos e transmitir as cargas para os apoios, geralmente pilares. Ao longo do eixo longitudinal as vigas podem ser curvas, mas na maioria das aplicações são retas e horizontais. Os carregamentos são provenientes de lajes, de outras vigas, de paredes de alvenaria, de pilares, geralmente perpendiculares ao eixo longitudinal. Momentos de torção e forças normais de compressão ou de tração, na direção do eixo longitudinal, também podem ocorrer (Bastos, 2019).

De acordo com Bastos (2019), as lajes são elementos planos que possuem como principal função servir de piso ou cobertura nas construções, recebendo as ações verticais aplicadas, provenientes da utilização da laje em função de sua finalidade arquitetônica, como de pessoas, móveis, pisos e paredes.

Pinheiro (2007) afirma que as lajes "são placas que, além das cargas permanentes, recebem as ações de uso e as transmitem para os apoios; travam os pilares e distribuem as ações horizontais entre os elementos de contraventamento". Podem apresentar-se em diferentes tipos, como: maciças, lisas, pré-moldadas e

nervuradas (moldadas no local e pré-moldadas, que são o foco desse trabalho).

2.2 LAJES NERVURADAS

2.2.1 Conceito

De acordo com NBR 6118 (2014), lajes nervuradas "são lajes moldadas no local ou com nervuras pré-moldadas, cuja zona de tração para momentos positivos esteja localizada nas nervuras entre as quais pode ser colocado material inerte".

Em relação as lajes maciças, as lajes nervuradas possuem um melhor aproveitamento do aço e do concreto devido a eliminação do concreto abaixo da linha neutra e consequentemente alívio de peso próprio da estrutura, de forma geral. Segundo Franca e Fusco (1997), "as lajes nervuradas constituíram-se em uma evolução natural da laje maciça, resultante da eliminação da maior parte do concreto abaixo da linha neutra, o que permite o aumento econômico da espessura total das lajes pela criação de vazios em um padrão rítmico de arranjo. Forma-se assim um sistema estrutural altamente eficiente, constituído por um conjunto de nervuras dispostas em uma ou duas direções, com espaçamentos regulares entre si".

2.2.2 Lajes nervuradas pré-moldadas

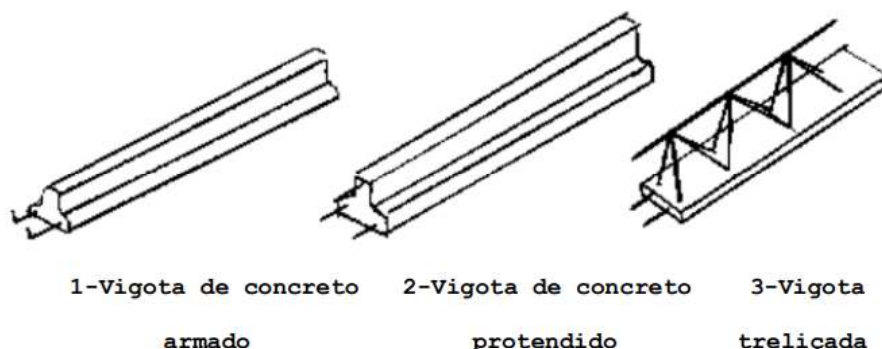
Franca e Fusco (1997) afirmam que na construção de lajes nervuradas pré-moldadas são empregados elementos pré-fabricados na forma de vigotas, para suportar as cargas da construção além do seu peso próprio, vencendo os vãos delimitados pelas linhas de apoio do cimbramento⁶. Estão presentes na forma de:

1. Vigotas de concreto armado comum, com seção transversal em formato de "T" invertido, com armadura passiva inteiramente envolvida pelo concreto;
2. Vigotas de concreto protendido, com seção transversal em formato de "T" invertido, com armadura ativa inteiramente envolvida pelo concreto;
3. Vigotas treliçadas, formadas por uma placa de concreto e com a armadura treliçada parcialmente envolvida pelo concreto.

A Figura 1 abaixo mostra os três tipos de vigotas presentes no mercado.

⁶ Conjunto de elementos para escoramento provisório.

Figura 1 — Vigotas pré-fabricadas



Fonte: Franca e Fusco (1997)

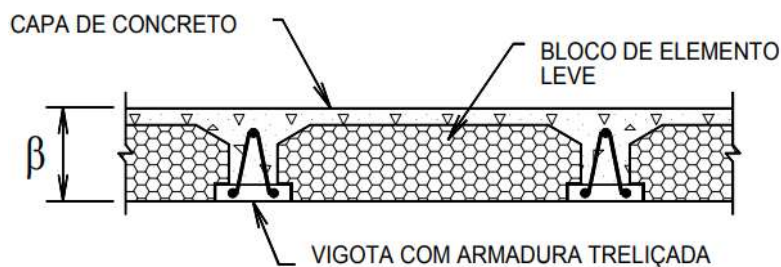
2.2.3 Lajes nervuradas pré-moldadas treliçadas

2.2.3.1 Caracterização

Segundo Bastos (2019) "as lajes pré-fabricadas do tipo treliçada, onde a armadura tem a forma de uma treliça espacial, vem ganhando maior espaço na aplicação em construções residenciais de pequeno porte e até mesmo em edifícios de baixa altura, principalmente devido ao bom comportamento estrutural e facilidade de execução".

As lajes pré-moldadas treliçadas são compostas por elementos de enchimento, lajotas cerâmicas ou blocos de E.P.S. (poliestireno expandido), vigotas pré-fabricadas e uma capa de concreto. De acordo com Franca e Fusco (1997), "nas lajes nervuradas os blocos de E.P.S. não participam da resistência final da estrutura, porém, por funcionarem como elementos estruturais durante os trabalhos de montagem das armaduras e de concretagem da laje, eles devem ser dimensionados para suportarem os esforços neles existentes durante a fase de construção". A Figura 2 a seguir apresenta os elementos que constituem as lajes pré-moldadas treliçadas.

Figura 2 — Elementos constituintes: laje pré-moldada treliçada



Fonte: Gaspar (1997)

A armadura das treliças são compostas por duas barras inferiores, uma barra superior e barras diagonais. De acordo com Franca e Fusco (1997), o diâmetro das barras inferiores podem variar de 4,2 mm a 10,0 mm, as diagonais de 3,4 mm a 6,0 mm e a superior de 6,0 mm a 10,0 mm. Além disso, é feito a identificação de cada tipo de treliça através de um conjunto de símbolos, como: TR-08634, onde:

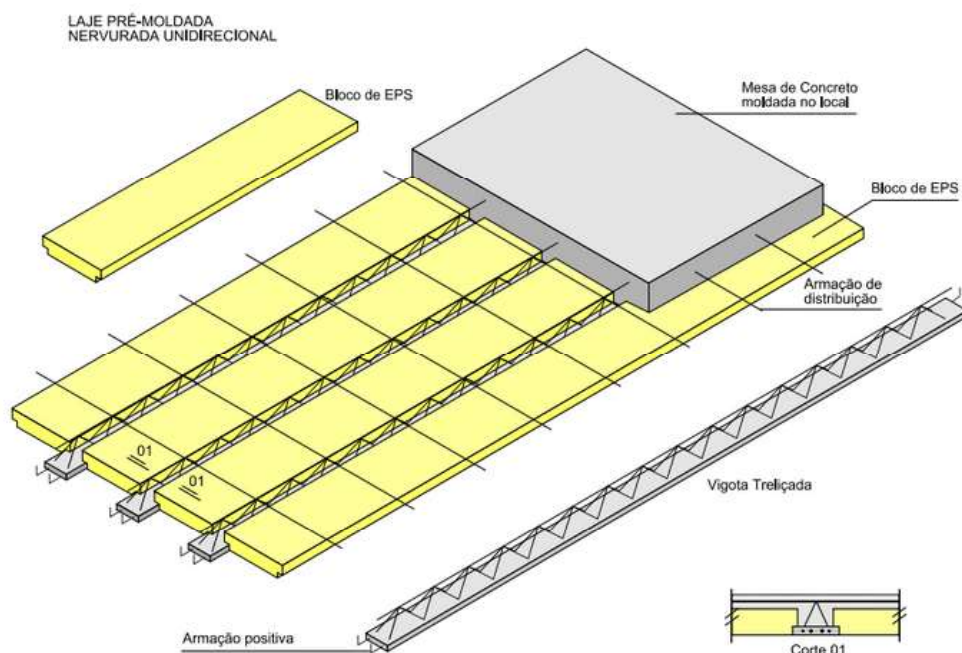
- (TR) caracteriza a armadura em treliça;
- (08) indica a treliça com 8 centímetros de altura;
- (6) indica a bitola Ø6 mm da barra superior da treliça;
- (3) indica a bitola Ø3,4 mm das diagonais;
- (4) indica a bitola Ø4,2 mm das barras inferiores.

Segundo Pinheiro (2019), "as barras inferiores têm função de resistirem as forças de tração, causadas pelo momento fletor positivo. No banzo superior, a barra atua como armadura de compressão durante a montagem e concretagem da laje e nas regiões de apoio central ajuda na resistência ao momento fletor negativo. Já as barras diagonais têm a finalidade de proporcionar aderência entre o concreto da viga e o da capa, além de funcionar como armadura de cisalhamento".

2.2.3.2 Lajes unidirecionais

De acordo com a NBR 14860-1 (2002), as lajes nervuradas unidirecionais apresentam nervuras principais longitudinais dispostas em uma única direção, como pode ser visto na Figura 3 a seguir.

Figura 3 — Laje pré-moldada treliçada unidirecional

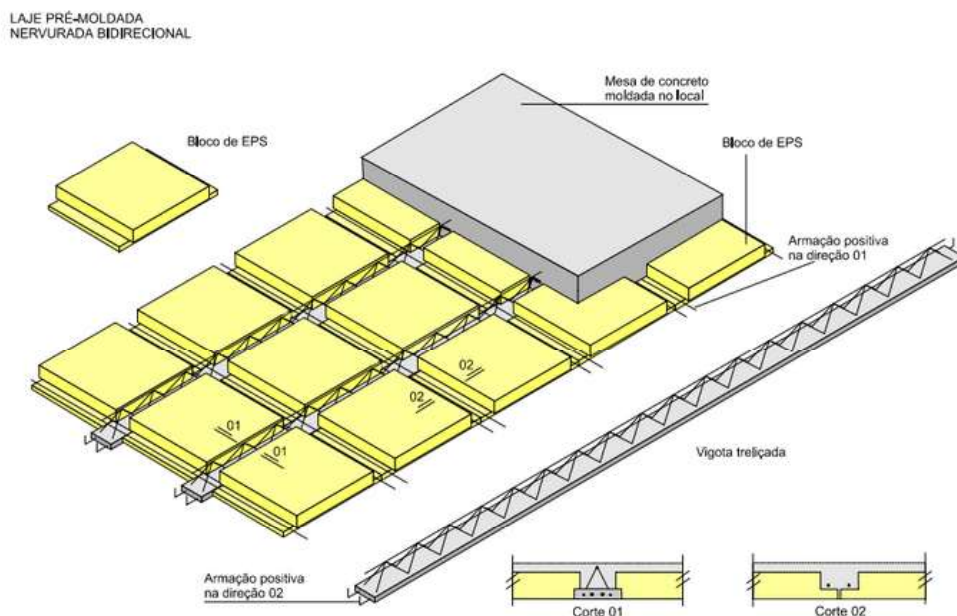


Fonte: Franca e Fusco (1997)

2.2.3.3 Lajes bidirecionais

Segundo Franca e Fusco (1997), "as características básicas das lajes enquadradas neste grupo são o fato de possuírem nervuras resistentes em duas direções ortogonais entre si, de serem constituídas por vigotas pré-fabricadas treliçadas, dispostas na direção do menor vão da laje, e por nervuras transversais moldadas no local, armadas com barras isoladas de aço". Além disso, tais lajes bidirecionais permitem grande diversificação de arranjos estruturais. A Figura 4 apresenta um exemplo utilizado nas edificações.

Figura 4 — Laje pré-moldada treliçada bidirecional



Fonte: Franca e Fusco (1997)

2.2.4 Verificações de cisalhamento

De acordo com a NBR 6118: 2014, a verificação de cisalhamento em lajes nervuradas com distância entre eixos das nervuras menor ou igual a 65 cm (que é o foco deste trabalho), pode ser feita através da força cortante resistente. Desta forma, verifica-se a necessidade ou não de armadura transversal para resistir as forças de tração oriundas da cortante. Temos que:

$$V_{sd} \leq V_{rd1} \quad (1)$$

Onde,

V_{sd} é a força cortante de cálculo;

V_{rd1} é a força cortante resistente de cálculo.

Temos que,

$$V_{rd1} = [\tau_{rd} \cdot k(1,2 + 40 \cdot \rho_1)]b_w \cdot d \quad (2)$$

Sendo,

τ_{rd} a tensão resistente de cálculo do concreto ao cisalhamento. Calculado por:

$$\tau_{rd} = 0,25 \cdot f_{ctd} \quad (3)$$

f_{ctd} , a resistência a tração do concreto de cálculo;

k , coeficiente com valores:

- $k = 1$, se 50% da armadura não chega ao apoio;
- $k = [1,6 - d]$ para os demais casos.

d , a altura útil;

b_w a largura mínima da seção ao longo de d ;

ρ_1 , calculado por:

$$\rho_1 = \frac{A_{s1}}{b_w \cdot d} \quad (4)$$

Onde,

A_{s1} , a área de armadura de tração.

Além da verificação do cisalhamento por força cortante, a NBR 6118:2014 traz outra verificação por carga concentrada. Neste método, se o efeito do carregamento pode ser considerado simétrico, a tensão de cisalhamento solicitante é dada por:

$$\tau_{sd} = \frac{F_{sd}}{u \cdot d} \times \frac{1}{2} \quad (5)$$

Sendo,

F_{sd} , a força concentrada de cálculo;

$u \cdot d$, a área de superfície crítica.

2.2.5 Prescrições da ABNT NBR 6118:2014

A NBR 6118 (2014) prescreve algumas condições de projeto que devem ser seguidas, tais como:

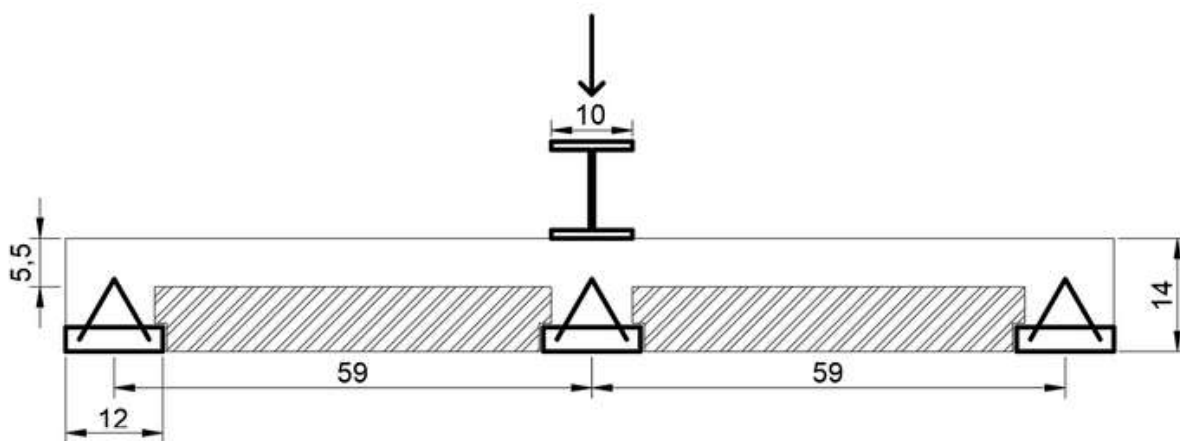
- A espessura mínima da mesa e das nervuras devem ser de 4 cm e 5 cm, respectivamente;
- Se houver tubulações embutidas de diâmetro menor ou igual a 10 mm o valor mínimo da espessura da mesa passa de 4 cm para 5 cm;
- Para tubulações embutidas de diâmetro $\varnothing$ maior que 10 mm, a espessura mínima da mesa deve ser de $4\text{ cm} + \varnothing$, ou $4\text{ cm} + 2\varnothing$ caso essas tubulações se cruzem;
- Não é permitido o uso de armadura de compressão em nervuras com espessura menor que 8 cm;
- Se o espaçamento entre os eixos das nervuras for maior que 110 cm, a mesa da laje nervurada deve ser calculada como maciça;
- Se o espaçamento entre os eixos das nervuras for menor que 65 cm, a verificação de flexão da mesa pode ser dispensada;
- Se o espaçamento entre os eixos das nervuras estiver entre 65 cm e 110 cm, deve ser feita a verificação de flexão na mesa e deverão ser verificadas ao cisalhamento como vigas.

3 ANÁLISE ANALÍTICA DAS LAJES ENSAIADAS

Para a realização do estudo comparativo foram utilizados 6 tipos de lajes com diferentes tipos de armadura, nas quais 3 delas apresentam tela (armadura de distribuição) na mesa e 3 não apresentam. Foi empregado um perfil metálico localizado no centro da laje a ser ensaiada, de direção coincidente com as vigotas pré-moldadas. Desta forma, será aplicado uma carga no centróide do perfil, simulando os efeitos do peso de uma alvenaria (carga distribuída) nas diferentes conformações das lajes.

O material de enchimento utilizado foi o poliestireno expandido (EPS) com 47 cm de largura, 10 cm de altura e 100 cm de comprimento. A tela utilizada é do tipo soldada Q138 10x10 de 4,2 mm de diâmetro. As vigotas pré-moldadas treliçadas utilizadas apresentam diâmetros das barras de aço dos banzos inferiores de 4,2 mm, banzo superior de 6,3 mm e diâmetros das diagonais de 4,2 mm (TR-08644), com intereixo de 59 cm. O perfil metálico utilizado é do tipo seção "I", com largura da aba de 10 cm e 15 de altura externa. A capa de concreto apresentou variações em sua espessura entre as peças. As figuras a seguir mostram as nomeações ST (sem tela) e CT (com tela) das 6 seções transversais utilizadas, bem como a localização da carga aplicada na laje e as cotas. A Laje 1ST não apresenta tela na mesa e a carga é aplicada sobre uma vigota.

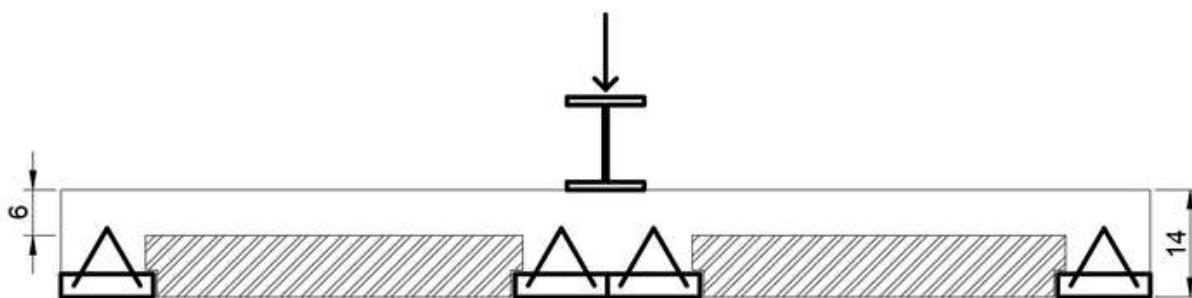
Figura 5 — Laje 1ST: sem tela na mesa (cotas em cm)



Fonte: O autor (2022)

A Laje 2ST não apresenta tela na mesa e a carga é aplicada sobre duas vigotas justapostas.

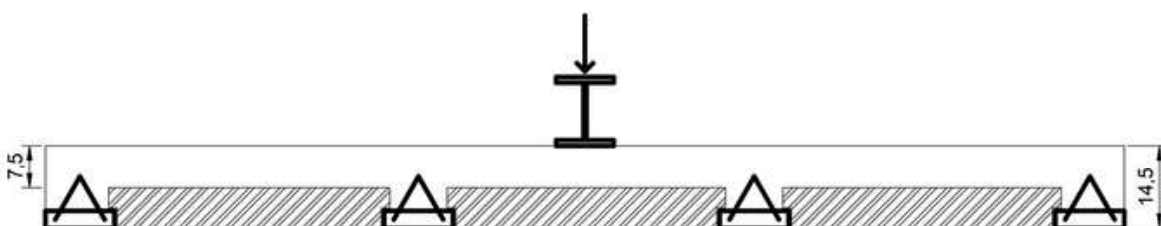
Figura 6 — Laje 2ST: sem tela na mesa (cotas em cm)



Fonte: O autor (2022)

A Laje 3ST não apresenta tela na mesa e a carga é aplicada sobre o elemento de enchimento (EPS).

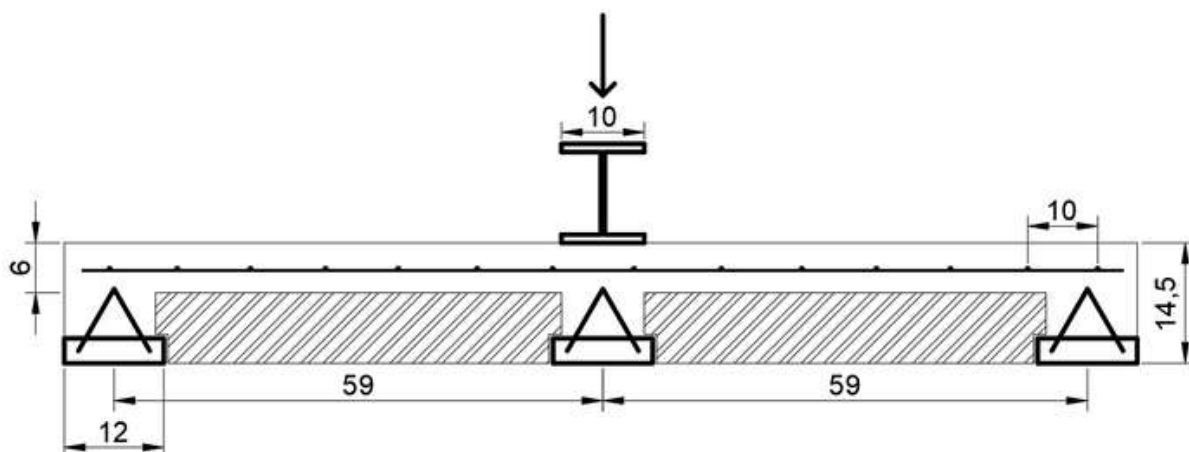
Figura 7 — Laje 3ST: sem tela na mesa (cotas em cm)



Fonte: O autor (2022)

A Laje 1CT apresenta tela na mesa e a carga é aplicada sobre uma viga, semelhante a Laje 1.

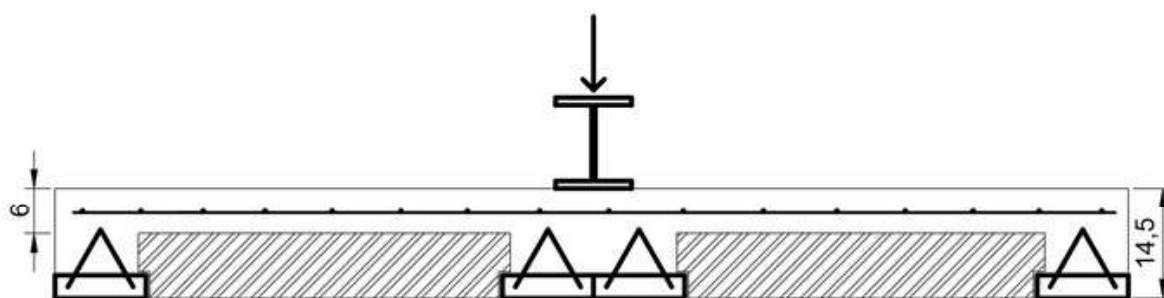
Figura 8 — Laje 1CT: com tela na mesa (cotas em cm)



Fonte: O autor (2022)

A Laje 2CT apresenta tela na mesa e a carga é aplicada sobre duas vigotas justapostas.

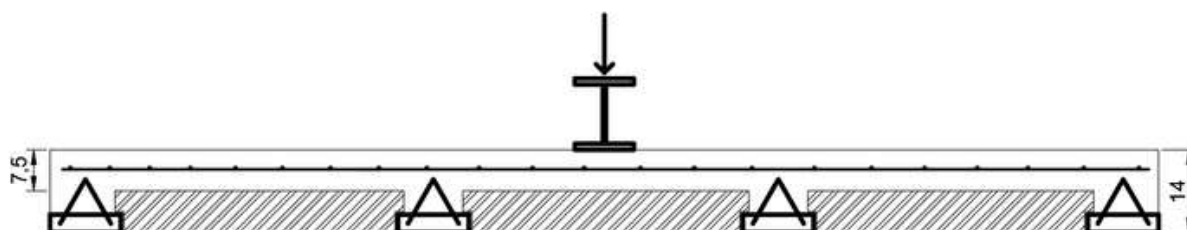
Figura 9 — Laje 2CT: com tela na mesa (cotas em cm)



Fonte: O autor (2022)

Por último, a Laje 3CT apresenta tela na mesa e a carga é aplicada sobre o elemento de enchimento (EPS).

Figura 10 — Laje 3CT: com tela na mesa (cotas em cm)



Fonte: O autor (2022)

A Tabela 1 apresenta as espessuras individuais das capas de concreto das lajes.

Tabela 1 — Espessura das capas de concreto

Laje	Espessura da capa (cm)
1ST	5,5
1CT	6,0
2ST	6,0
2CT	6,0
3ST	7,5
3CT	7,5

Fonte: O autor (2022)

4 ANÁLISE EXPERIMENTAL

Apresenta-se a seguir a análise experimental dos ensaios feitos em laboratório. Para isso, inicialmente serão detalhados as instrumentações, os materiais e equipamentos utilizados. Logo em sequência apresenta-se o sistema de ensaio aplicado.

4.1 INSTRUMENTAÇÕES

Para medir as deformações e os deslocamentos sofridos pelo elemento estrutural (concreto e aço) após a aplicação do carregamento, foram utilizados extensômetros elétricos (strain gauges) e transdutores indutivos, respectivamente.

Os extensômetros são sensores capazes de medir a deformação a partir da variação de sua resistência elétrica. Segundo Savi (1981), o "extensômetro de resistência variável, consiste essencialmente de uma grade constituída de um fio muito fino presa a uma ou duas folhas de papel tratado ou qualquer outro material portador conveniente. Com o extensômetro colado na superfície do material em teste, cargas são aplicadas o que acarreta a sua deformação junto com a superfície onde está montado. Assim, a variação da sua resistência elétrica é uma medida de deformação média do material no local sob o sensor".

A Figura 11 a seguir mostra o extensômetro colado na parte superior da laje, na mesma direção das vigotas e do perfil metálico.

Figura 11 — Extensômetro colado



Fonte: O autor (2022)

Também foi colocado um extensômetro no aço de cada laje, antes de ocorrer a concretagem. É importante salientar que o mesmo foi posicionado nas barras inferiores da treliça (banzo inferior). Desta forma, foi possível ler as deformações no concreto e aço após o ensaio de carga.

Os transdutores utilizados foram do tipo LVDT (Linear Variable Differential Transformer). Os mesmos são responsáveis por medir os deslocamentos posteriores a aplicação do carregamento, através da indução eletromagnética.

4.2 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

Para o desenvolvimento dos ensaios foram utilizados:

- Célula de carga, com capacidade de 500 kN;
- Transdutores indutivos, do tipo LVDT (WA/50 mm);
- Extensômetro elétrico (Mx16);
- Sistema de aquisição de dados, modelo HBM Quantum;
- Conjunto bomba-cilindro hidráulico, com capacidade de 500 kN;
- Perfil metálico do tipo seção "I", com largura da aba de 10 cm e 15 de altura externa;
- Máquina eletromecânica, com capacidade de 600 kN;
- Paquímetro, para medida de diâmetro e comprimento dos CP's;
- Fissurômetro.

4.3 PROCEDIMENTOS DE ENSAIO

Para realização do estudo foram feitos diversos ensaios em corpos de prova (CP's) retirados durante a concretagem das lajes - 9 ao total - a fim de verificar as resistências de tração, compressão e propriedades do concreto. Utilizou-se a máquina eletromecânica, com capacidade máxima de 600 kN, como pode ser observado na Figura 12 a seguir.

Figura 12 — Aparelho de ensaios EMIC



Fonte: O autor (2022).

4.3.1 Resistência à compressão do concreto

Para verificar a resistência à compressão do concreto foram utilizados 3 CP's e os resultados do ensaio são apresentados na Tabela 2 abaixo.

Tabela 2 — Resistência à compressão do concreto

CP's	Força máxima (kgf)	Tensão máxima (MPa)	Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)
CP1	33334,25	41,14	38,19	2,695
CP2	30370,55	37,60		
CP3	29077,99	35,85		

Fonte: O autor (2022)

4.3.2 Resistência à tração do concreto

Para verificar a resistência à tração do concreto foi utilizado o ensaio do tipo compressão diametral, em 3 CP's. Os valores de força máxima obtidos estão expressos na Tabela 3.

Tabela 3 — Valores de força máxima

CP's	Força máxima (kgf)	Força máxima (N)
CP4	10681,16	104782,18
CP5	7953,63	78025,11
CP6	12777,73	125349,53

Fonte: O autor (2022)

Segundo a NBR 7222 (2010), a resistência à tração por compressão diametral é calculada pela expressão:

$$f_{ct,sp} = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot d \cdot l} \quad (6)$$

Sendo:

$f_{ct,sp}$, a resistência à tração do concreto por compressão diametral, expressa em megapascals (MPa);

F força máxima obtida no ensaio, expressa em N;

d é o diâmetro do CP, dado em mm;

l é o comprimento do CP, dado em mm.

Desta forma, para obtenção de todos os dados presentes na Equação 1 foram feitas duas medidas de diâmetro e comprimento para cada CP, com o auxílio de um paquímetro. Os dados estão expressos na Tabela 4.

Tabela 4 — Medidas de diâmetro e comprimento dos CP's

CP's	l (mm)	Média l (mm)	d (mm)	Média d (mm)
CP4	198,65	198,75	99,73	99,97
	199,86		100,21	
CP5	197,14	198,01	100,67	100,18
	198,89		99,70	
CP6	200,14	200,01	100,35	99,97
	199,88		199,88	

Fonte: O autor (2022)

Assim, aplicando a Equação 1 para o CP4:

$$f_{ct,sp} = \frac{2 \cdot 104782,18}{\pi \cdot 198,75 \cdot 99,97} = 3,357 MPa \quad (7)$$

Os resultados das resistências à tração estão expressos na Tabela 5.

Tabela 5 — Resistência à tração do concreto

CP's	f _{ct,sp} (MPa)	Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)
CP4	3,357	3,284	0,746
CP5	2,504		
CP6	3,991		

Fonte: O autor (2022)

4.3.3 Módulo de elasticidade do concreto

O módulo de elasticidade (E_c) do concreto foi obtido experimentalmente de acordo com a NBR 8522 (2008). Utilizou-se 3 CP's e os resultados do ensaio estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 — Módulo de elasticidade do concreto

CP's	E _c (GPa)	Média (GPa)	Desvio padrão (MPa)
CP7	33,90	32,80	1,85
CP8	33,90		
CP9	30,70		

Fonte: O autor (2022)

4.3.4 Resistência do aço

Para verificação da resistência do aço, foram feitos ensaios de tração com quatro amostras, sendo duas com o aço da treliça (barras inferiores) e duas com o aço da tela. A resistência última do aço, ou tensão de ruptura (f_{st}) é dada por:

$$f_{st} = \frac{F_{rup}}{A \cdot 1000} [MPa] \quad (8)$$

Sendo:

F_{rup} a força máxima de ruptura, em kgf;

A a área da seção transversal do aço, em cm^2 .

Os valores de F_{rup} obtidos no ensaio estão apresentados na Tabela 6. Foram utilizados duas amostras para o mesmo.

Tabela 7 — Valores de tensão máxima do aço

Aço	F_{rup} (kgf)
Treliça	992,00
Tela	775,00

Fonte: O autor (2022)

Para calcular a área da seção transversal, foi necessário retirar duas, das quatro amostras para medição de peso e comprimento. A Tabela 7 apresenta esses valores.

Tabela 8 — Valores de peso e comprimento das amostras

Aço	Peso (g)	Comprimento (mm)
Treliça	16,98	151,00
Tela	9,44	91,00

Fonte: O autor (2022)

A área da seção transversal é dada por:

$$A = \frac{M}{L \cdot \rho} [cm^2] \quad (9)$$

Sendo:

M o peso da amostra, em g;

L o comprimento da amostra, em cm;

ρ a massa específica do aço, equivalente a $7,85 \text{ g/cm}^3$.

Para a treliça, temos:

$$A = \frac{16,98}{1510 \cdot 7,85} = 1,43 \times 10^{-3} cm^2 \quad (10)$$

Assim,

$$f_{st} = \frac{992}{1,43 \cdot 10^{-3} \cdot 1000} = 693,71 \text{ MPa} \quad (11)$$

Para o cálculo do alongamento sofrido pelo aço durante os ensaios, mediu-se o comprimento inicial e final das duas amostras ensaiadas. É dado pela expressão a seguir:

$$\text{Along.} = \left(\frac{L_f - L_0}{L_0} \right) \times 100 \quad (12)$$

Sendo,

L_f o comprimento final da amostra de aço, em mm;

L_0 o comprimento inicial da amostra de aço, em mm.

Os resultados finais de tensão de ruptura, tensão de escoamento (f_y) e alongamento do aço obtidos durante os ensaios estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 9 — Tensão de ruptura e alongamento do aço

Aço	A (cm ²)	F _{rup} (kgf)	f _{st} (MPa)	f _y (MPa)	L ₀ (mm)	L _f (mm)	Along. (%)
Treliça	1,43x10-3	992,00	693,71	563,25	385,00	399,00	3,64
Tela	1,32x10-3	775,00	587,12	436,46	376,00	380,00	1,06

Fonte: O autor (2022)

4.3.5 ENSAIO DAS LAJES

Primeiramente foram utilizados blocos de concreto maciço para apoio das lajes, como pode ser observado na Figura 13.

Figura 13 — Blocos de concreto maciço



Fonte: O autor (2022)

Logo em seguida, a laje a ser ensaiada foi apoiada nos blocos na direção de menor comprimento, 10 cm em cada lado. Na sequência, colocou-se o perfil metálico na direção das vigotas (menor vão) e a célula de carga no centróide da laje, em cima do perfil (Figura 14).

Figura 14 — Esquema de ensaio



Fonte: O autor (2022).

Posteriormente, foram colocados 4 transdutores indutivos do tipo LVDT, 2 em cada lateral da laje para medida de deslocamento (Figura 15).

Figura 15 — Posicionamento lateral dos transdutores



Fonte: O autor (2022)

Também foi fixado um LVDT no centróide da laje, para verificação de deslocamentos verticais, conforme Figura 16.

Figura 16 — Posicionamento transdutor central



Fonte: O autor (2022)

Com todos os elementos posicionados, ligou-se a célula de carga, os extensômetros e os transdutores indutivos ao sistema de aquisição de dados para a leitura. Por fim, aplicava-se a carga por meio do conjunto bomba-cilindro.

A carga era aplicada conforme observa-se o aparecimento de fissuras nas laterais. Assim, registrava-se na laje a carga de surgimento da fissura e também acompanhava-se o seu desenvolvimento com o aumento do carregamento, através

de um fissurômetro. A Figura 17 mostra a vista lateral da laje 2ST durante o ensaio de carregamento.

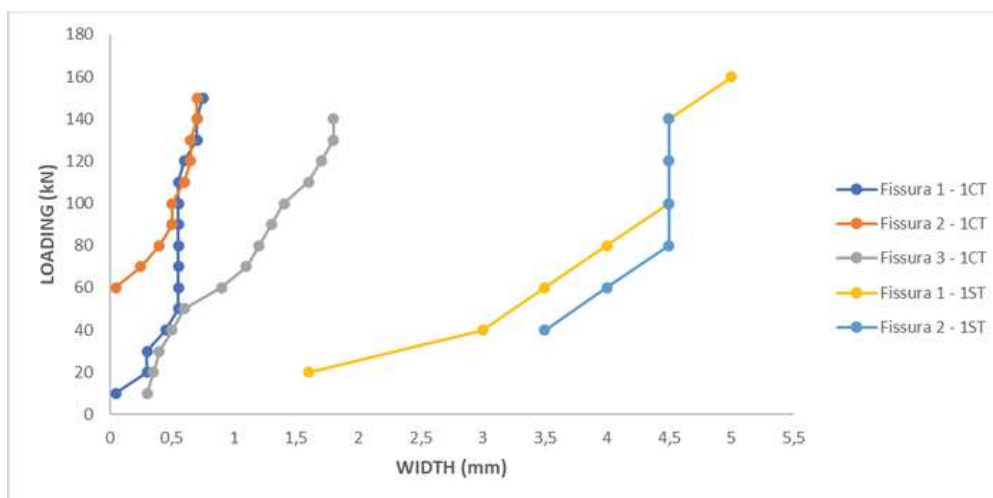
Figura 17 — Vista lateral da laje durante carregamento



Fonte: O autor (2022)

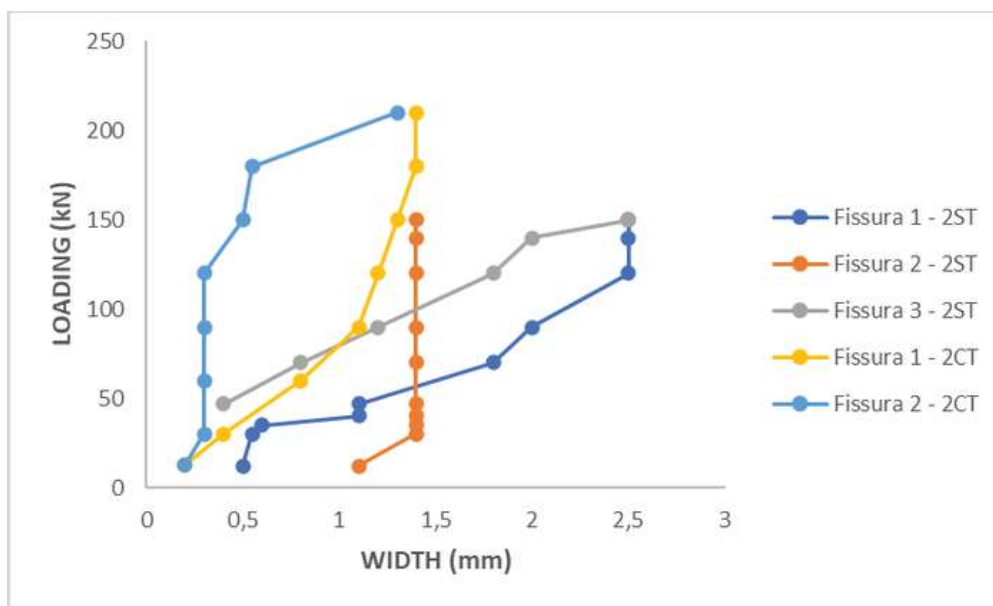
Os gráficos a seguir (Gráfico 1 ao Gráfico 3) mostram a evolução das fissuras com o aumento da carga aplicada. Analisando-os, observa-se um padrão de influência da tela na fissuração das lajes, uma vez que, as peças que não possuem a mesma, apresentaram fissuras maiores para cargas próximas. De modo geral, as lajes apresentaram aumento em suas fissuras proporcionais ao aumento da carga.

Gráfico 1 — Força x Largura fissuras - Lajes 1ST e 1CT



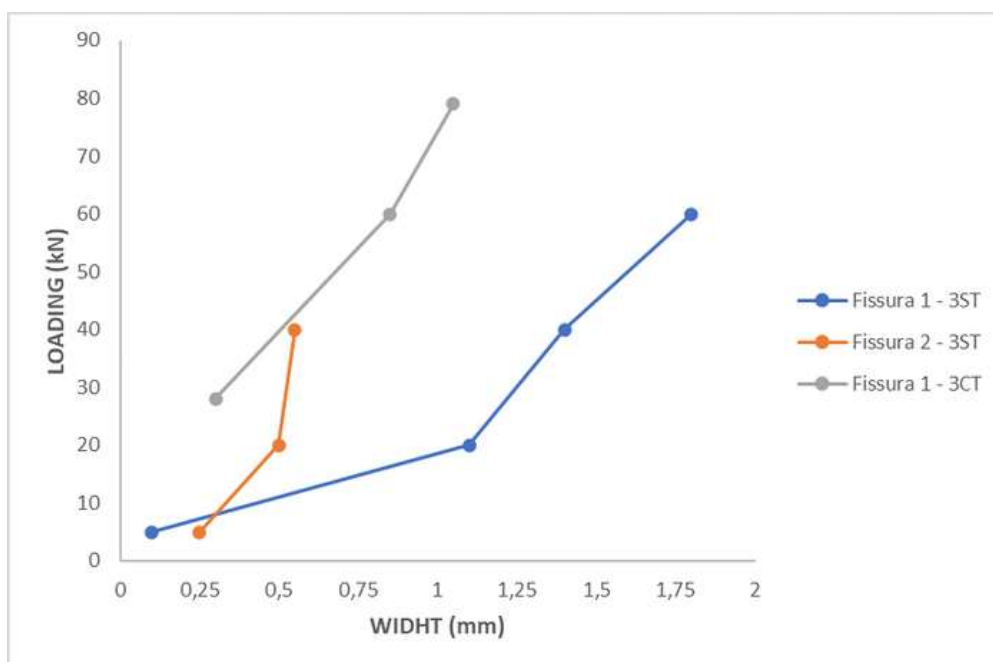
Fonte: O autor (2022)

Gráfico 2 — Força x Largura fissuras - Lajes 2ST e 2CT



Fonte: O autor (2022)

Gráfico 3 — Força x Largura fissuras - Lajes 3ST e 3CT



Fonte: O autor (2022)

O ensaio era finalizado com a ruína do elemento estrutural. A Tabela 10 mostra a carga de ruptura de cada peça.

Tabela 10 — Carga de ruptura (continua)

Laje	Carga de ruptura (kN)
------	-----------------------

Tabela 10 — Carga de ruptura (conclusão)

1ST	191,67
1CT	191,07
2ST	149,98
2CT	360,30
3ST	77,16
3CT	79,63

Fonte: O autor (2022)

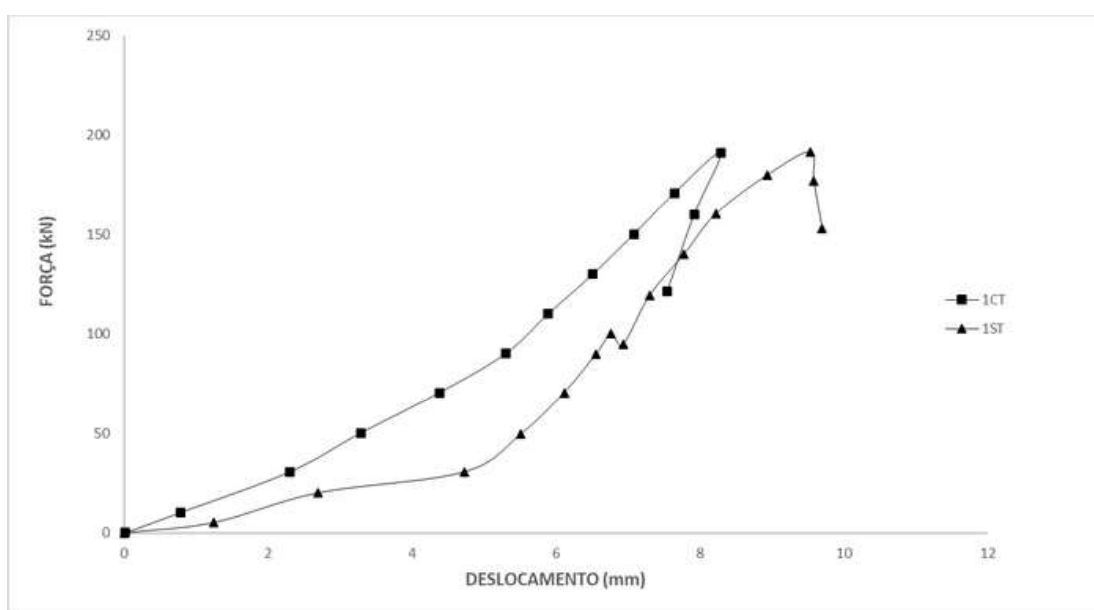
A seguir serão analisados os resultados de deslocamento vertical e ruptura, através dos dados dos ensaios.

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1 DESLOCAMENTO VERTICAL

Para a análise dos deslocamentos verticais (flechas) sofridos pelas lajes durante o ensaio, utilizou-se os dados do LVDT central, posicionado de acordo com a Figura 16. O Gráfico 4 abaixo mostra o comportamento das lajes com apenas uma vigota, com e sem tela na mesa.

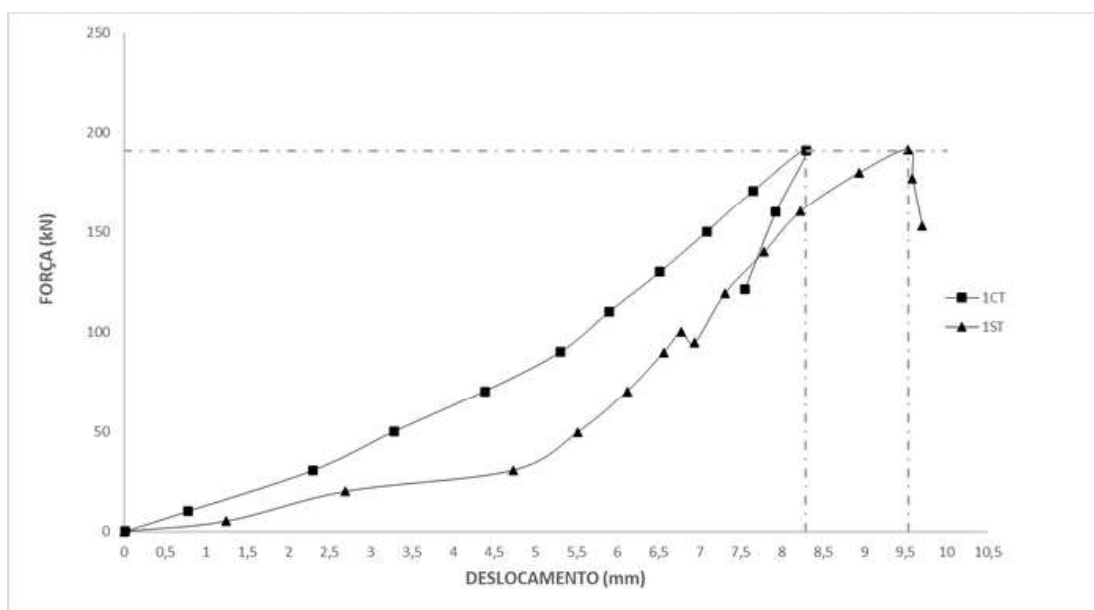
Gráfico 4 — Força x Deslocamento (Lajes 1ST e 1CT)



Fonte: O autor (2022).

Em análise do Gráfico 4, observa-se que não houve influência da tela na carga de ruptura para as duas lajes. Por outro lado, a laje 1CT apresentou uma flecha inferior para a mesma carga de ruptura de 191 kN, aproximadamente, como pode ser visto no Gráfico 5.

Gráfico 5 — Força x Deslocamento (Lajes 1ST e 1CT) (detalhado)

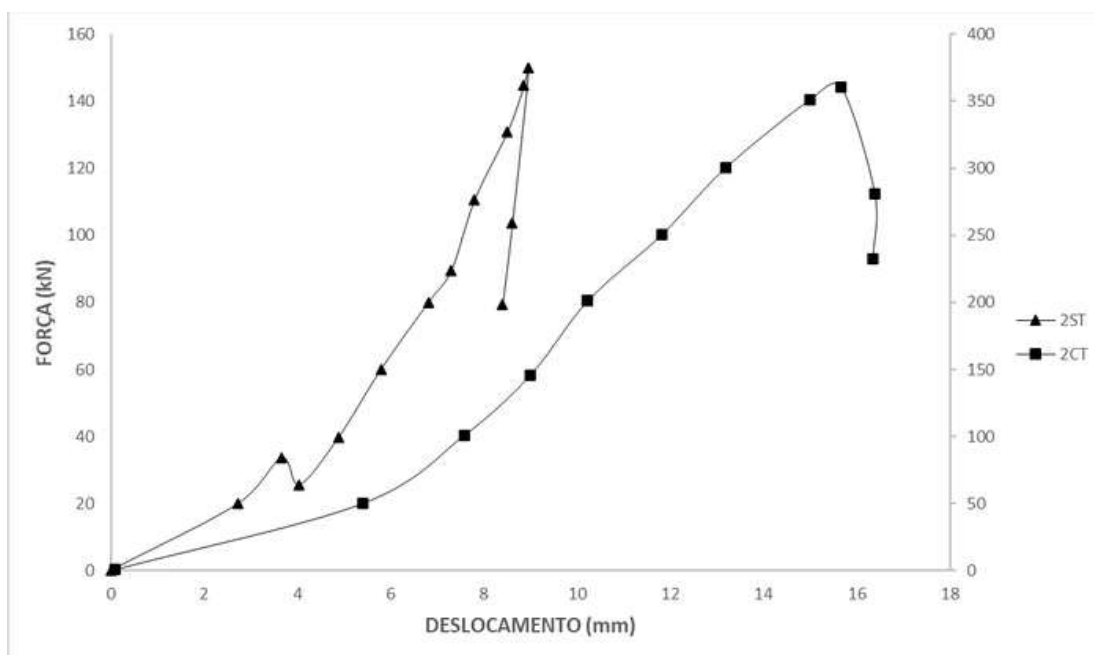


Fonte: O autor (2022).

Na ruptura, as lajes 1CT e 1ST apresentaram um deslocamento vertical de 8,3 mm e 9,5 mm, respectivamente.

O Gráfico 6 a seguir mostra o comportamento das lajes com duas vigotas, com e sem tela na mesa.

Gráfico 6 — Força x Deslocamento (Lajes 2ST e 2CT)

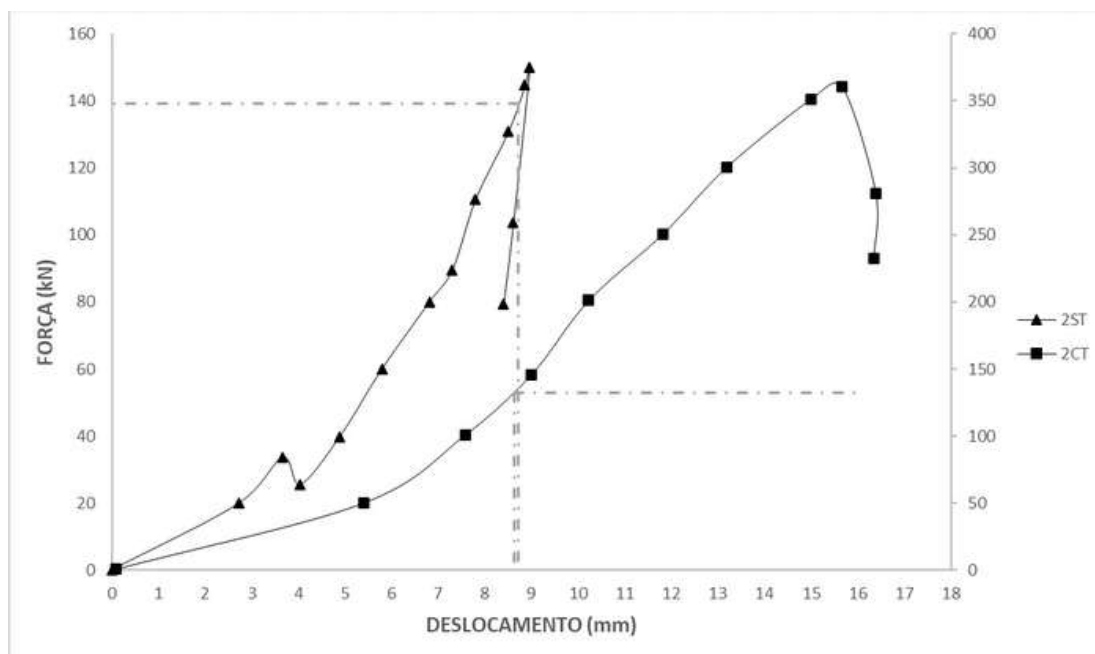


Fonte: O autor (2022).

A partir do Gráfico 6 e da Tabela 10, observa-se expressiva influência da tela

na carga de ruptura, com um total de 210,32 kN de diferença. Por outro lado, não houve significativas alterações na flecha, para uma mesma carga, como mostra o Gráfico 7.

Gráfico 7 — Força x Deslocamento (Lajes 2ST e 2CT) (detalhado)

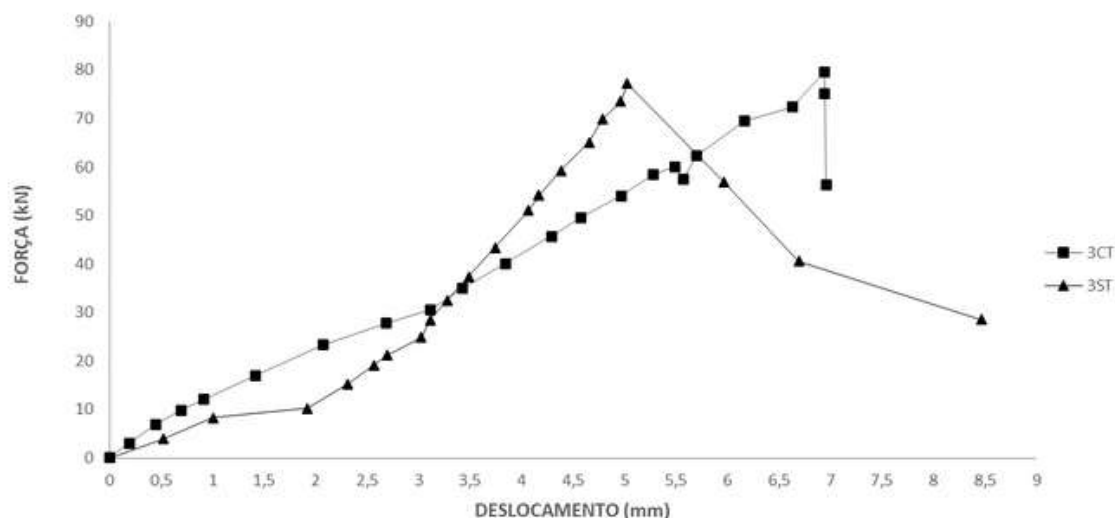


Fonte: O autor (2022).

As lajes 2ST e 2CT apresentaram para uma carga de 140 kN, flechas de 8,6 mm e 8,7 mm, respectivamente.

O Gráfico 8 a seguir mostra o comportamento das lajes com uma vigota, com e sem tela na mesa, porém com a carga sobre o elemento de enchimento (EPS).

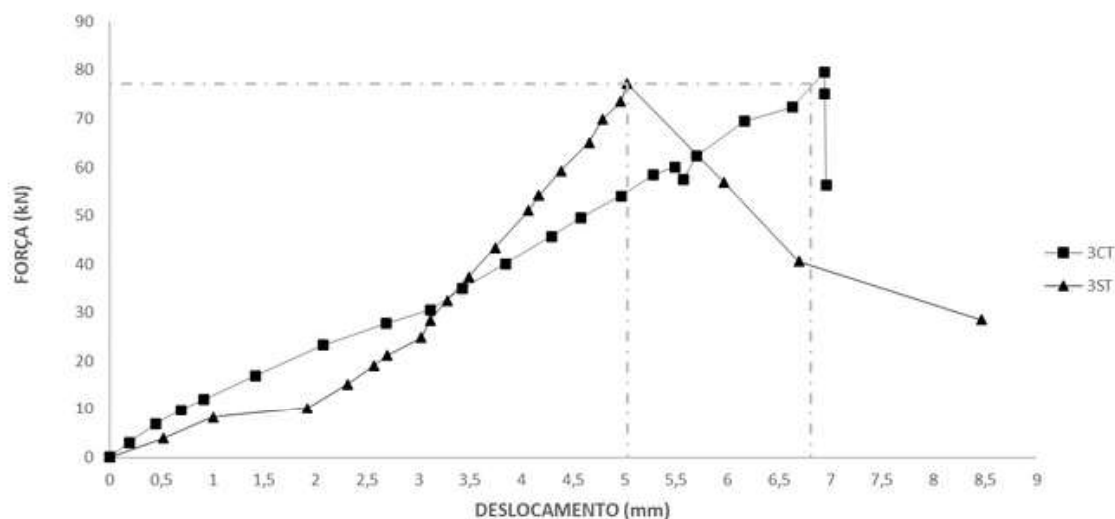
Gráfico 8 — Força x Deslocamento (Lajes 3ST e 3CT)



Fonte: O autor (2022).

Em análise do Gráfico 8 e da Tabela 10, nota-se que houve pouca influência da tela na carga de ruptura para as duas lajes. Além disso, observou-se grande diferença no deslocamento vertical para uma mesma carga aplicada (Gráfico 9).

Gráfico 9 — Força x Deslocamento (Lajes 3ST e 3CT) (detalhado)



Fonte: O autor (2022).

Diferentemente das outras peças, o elemento composto por tela apresentou maiores deslocamentos em determinadas cargas. As lajes 3ST e 3CT apresentaram para uma carga de 77,15 kN, flechas de 5,0 mm e 6,8 mm, respectivamente.

Foi possível observar uma maior influência da tela nas lajes com duas vigotas, em termos de capacidade de suporte. Além da carga, também notou-se

grande atuação da tela no deslocamento vertical das lajes. De modo geral, essa influência mostrou ser positiva.

5.2 RUPTURA

Para análise de ruptura foi necessário comparar as tensões solicitantes e as tensões resistentes das peças. De acordo com a NBR 6118:2014, a tensão de cisalhamento resistente é dado por:

$$\tau_{swr} = 0,30 \times f_{ct} \quad (13)$$

Sendo,

f_{ct} a resistência do concreto a tração direta, em MPa.

Assim:

$$f_{ct} = f_{ct,sp} \times 0,9 \quad (14)$$

Para efeito de segurança será considerado o valor mínimo de resistência, encontrado no CP5, como mostra a Tabela 5. Logo,

$$f_{ct} = 2,504 \times 0,9 = 2,25 MPa \quad (15)$$

Logo,

$$\tau_{swr} = 0,30 \times 2,25 = 0,68 MPa \quad (16)$$

Para o trabalho em questão, a tensão de cisalhamento solicitante mencionada no módulo 2 será calculada através da carga distribuída. Sendo assim:

$$\tau_{swu} = \frac{F_{dist}}{u \times d \times 1000} \times \frac{1}{2} \quad (17)$$

Onde,

F_{dist} , a carga de ruptura da laje distribuída no vão, em kN/m;

$u \times d$, a área de superfície crítica, em m². Considera-se o cálculo para 1 metro de laje ($u = 1$ m) e que a ruptura se dá na mesa ($d = 6$ cm).

Assim, calculando a tensão para a laje 1ST, tem-se:

$$F_{dist} = \frac{F_{rup}}{V_{\tilde{a}o}} = \frac{191,67}{1,07} = 179,13 \text{ kN/m} \quad (18)$$

Logo,

$$\tau_{swu} = \frac{179,13}{1 \times 0,055 \times 1000} \times \frac{1}{2} = 1,63 \text{ MPa} \quad (19)$$

O mesmo procedimento de cálculo foi feito para as outras lajes. A Tabela 11 apresenta os resultados de tensão de cisalhamento solicitante.

Tabela 11 — Tensões de cisalhamento solicitante

Laje	Força de ruptura (kN)	Força distribuída (kN/m)	τ_{swu} (MPa)
1ST	191,67	179,13	1,63
1CT	191,07	178,57	1,49
2ST	149,98	140,17	1,17
2CT	360,30	336,73	2,81
3ST	77,16	72,11	0,48*
3CT	79,63	74,42	0,50*

Fonte: O autor (2022)

Observa-se que as lajes 3ST e 3CT não apresentaram ruptura por este método, haja visto que a tensão solicitante está inferior a resistente, o que contraria os resultados experimentais. Desta forma, a tensão de cisalhamento resistente será calculada através da força cortante. É importante ressaltar que também foi

considerado o valor mínimo de resistência a compressão do concreto, para efeito de segurança. Assim para a laje 3ST, tem-se:

$$V_{rd} = [\tau_{rd} \cdot k(1,2 + 40 \cdot \rho_1)]b_w \cdot d \quad (20)$$

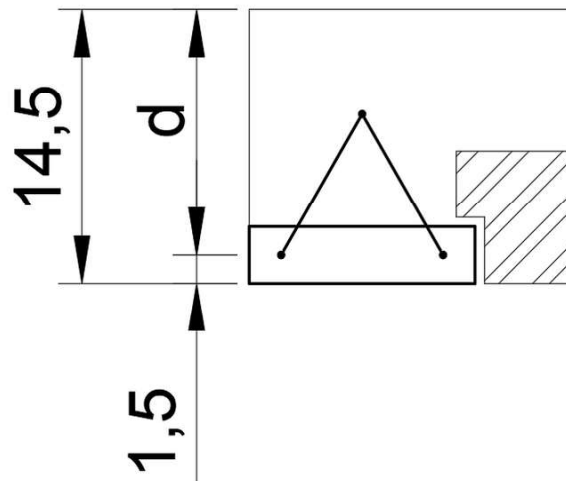
$$\tau_{rd} = 0,0525 \cdot f_c^{2/3} = 0,0525 \times 35,85^{2/3} = 0,571 MPa \quad (21)$$

Para o coeficiente "k", tem-se:

$$k = [1,6 - d] \quad (22)$$

A altura útil "d", pode ser visualizada na Figura 18.

Figura 18 — Altura útil - 3ST (cotas em cm)



Fonte: O autor (2022)

Portanto, $d = 13 \text{ cm}$ ($0,13 \text{ m}$). Então:

$$k = [1,6 - 0,13] = 1,47 \quad (23)$$

Além disso,

$$\rho_1 = \frac{A_{s1}}{b_w \cdot d} \quad (24)$$

Onde,

b_w é a largura da alma (10 cm);

A_{s1} é a área de armadura de tração, em cm^2 .

Para cálculo da área de armadura de tração, devemos considerar as duas barras inferiores de 4,2 mm da treliça. Para 1 barra de 4,2 mm obtemos 0,1385 cm^2 de área. Logo:

$$A_{s1} = 2 \times 0,1385 = 0,277 \text{ cm}^2 \quad (25)$$

Portanto,

$$\rho_1 = \frac{0,277}{10 \cdot 13} = 2,131 \times 10^{-3} \quad (26)$$

Por fim,

$$V_{rdu} = [0,571 \cdot 1,47(1,20 + 40 \cdot 0,00231) \cdot 0,1 \cdot 0,13] \times 10^3 \quad (27)$$

$$V_{rdu} = 14,10 \text{ kN/vigota} \quad (28)$$

Para o cálculo da força cortante solicitante, será utilizado a força de ruptura distribuída, que por sua vez será dividida entre duas vigotas. Desta forma, em uma nervura tem-se:

$$F_{dist, nerv} = 72,11/2 = 36,06kN/m \quad (29)$$

Logo, a força cortante solicitante será:

$$V_u = \frac{F_{dist} \times v\tilde{a}o}{2} = \frac{36,06 \times 1,07}{2} = 19,29kN/vigota \quad (30)$$

Como a força cortante solicitante é superior a resistente conclui-se que a laje rompeu, conforme observado no ensaio experimental de laboratório, como pode ser visualizado na Figura 19.

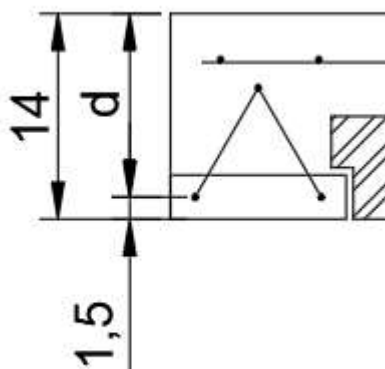
Figura 19 — Laje 3ST - Ruptura



Fonte: O autor (2022)

Para a laje 3CT, temos uma pequena mudança na altura útil (Figura 20) e força cortante solicitante.

Figura 20 — Altura útil - 3CT (cotas em cm)



Fonte: O autor (2022)

Assim,

$$k = [1,6 - (0,14 - 0,015)] = 1,475 \quad (31)$$

Portanto,

$$\rho_1 = \frac{0,277}{10 \cdot 12,5} = 2,216 \times 10^{-3} \quad (32)$$

Por fim,

$$V_{rdu} = [0,571 \cdot 1,475(1,20 + 40 \cdot 0,002216) \cdot 0,1 \cdot 0,125] \times 10^3 \quad (33)$$

$$V_{rdu} = 13,57kN/vigota \quad (34)$$

Para o cálculo da força cortante solicitante, tem-se:

$$F_{dist, nerv} = 74,42/2 = 37,21kN/m \quad (35)$$

Logo, a força cortante solicitante será:

$$V_u = \frac{F_{dist} \times v\tilde{a}o}{2} = \frac{37,21 \times 1,07}{2} = 19,91kN/vigota \quad (36)$$

A força cortante solicitante também é superior a resistente. A Figura 21 mostra a ruptura da laje em questão.

Figura 21 — Laje 3CT - Ruptura



Fonte: O autor (2022)

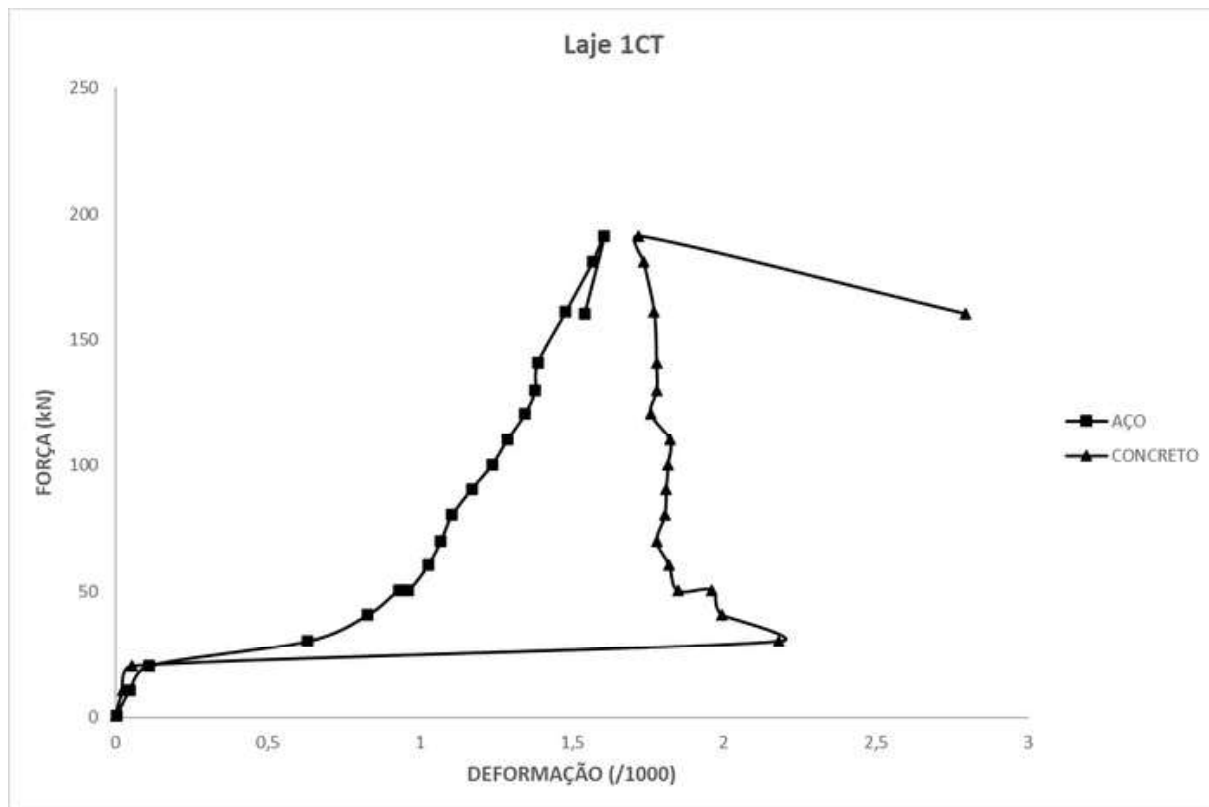
O Anexo A apresenta as fotos de ruptura das lajes ensaiadas.

5.3 DEFORMAÇÃO

Para a análise de deformação sofrida pelo concreto e pelo aço das treliças, foram utilizados os dados obtidos através dos extensômetros. Os gráficos abaixo (Gráfico 10 ao Gráfico 15) mostram as curvas de Força x Deformação dos elementos

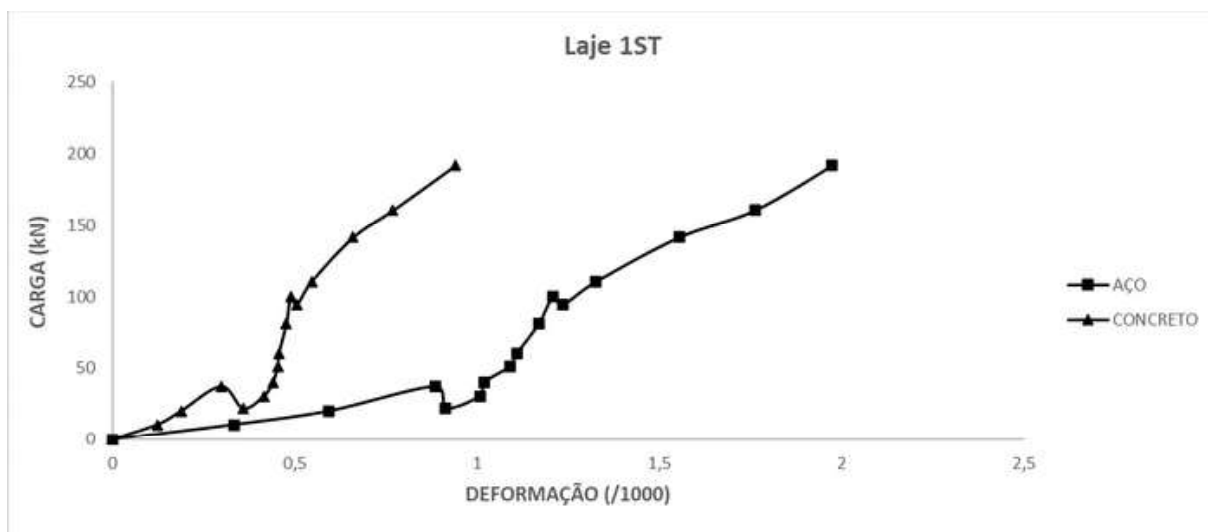
citados. Salienta-se que os extensômetros do aço das lajes 2CT e 3CT apresentaram erros de leitura.

Gráfico 10 — Força x Deformação (Laje 1CT)



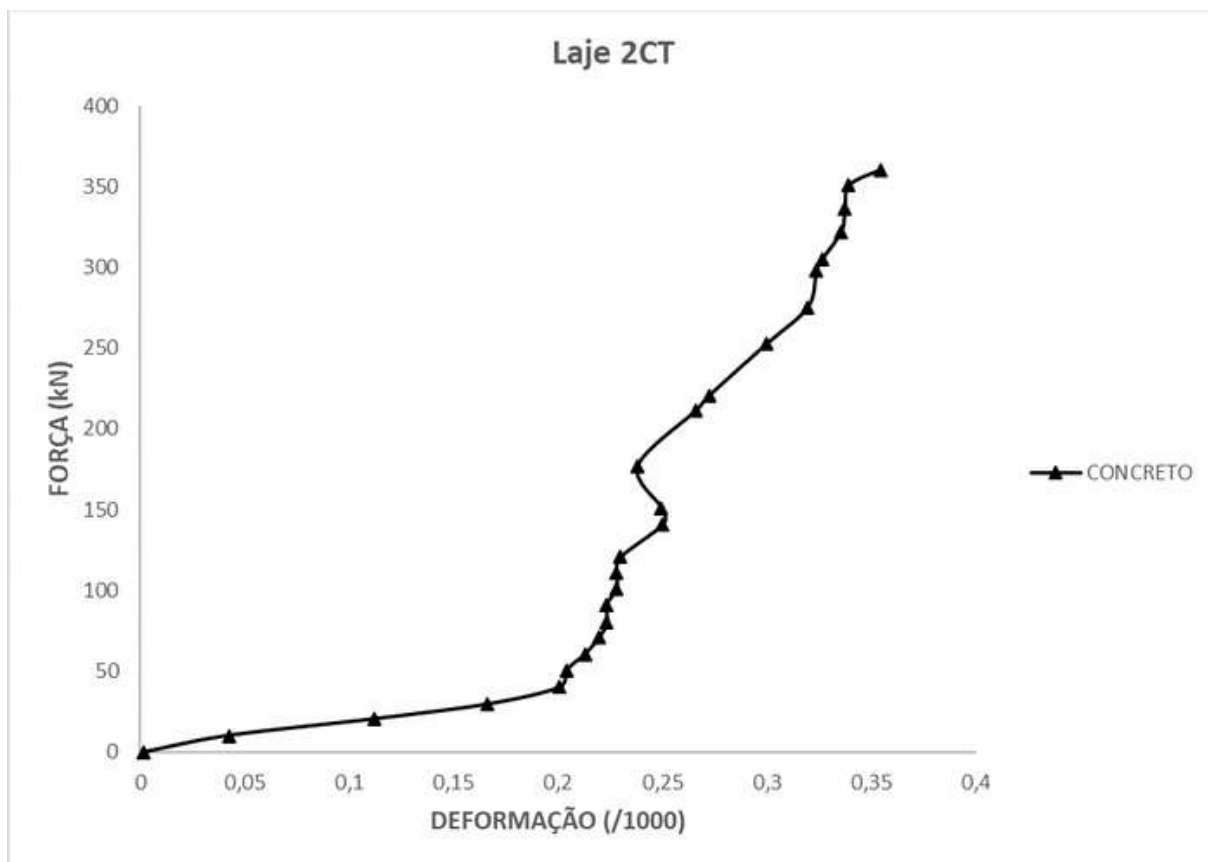
Fonte: O autor (2022).

Gráfico 11 — Força x Deformação (Laje 1ST)



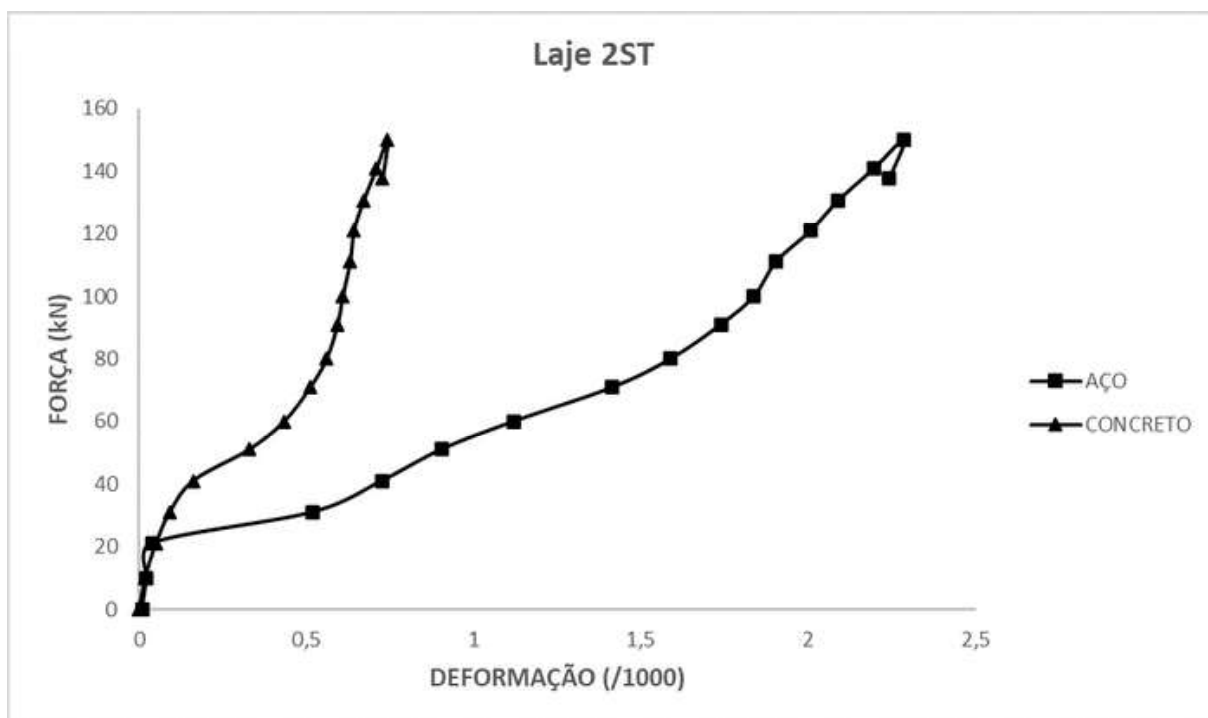
Fonte: O autor (2022).

Gráfico 12 — Força x Deformação (Laje 2CT)



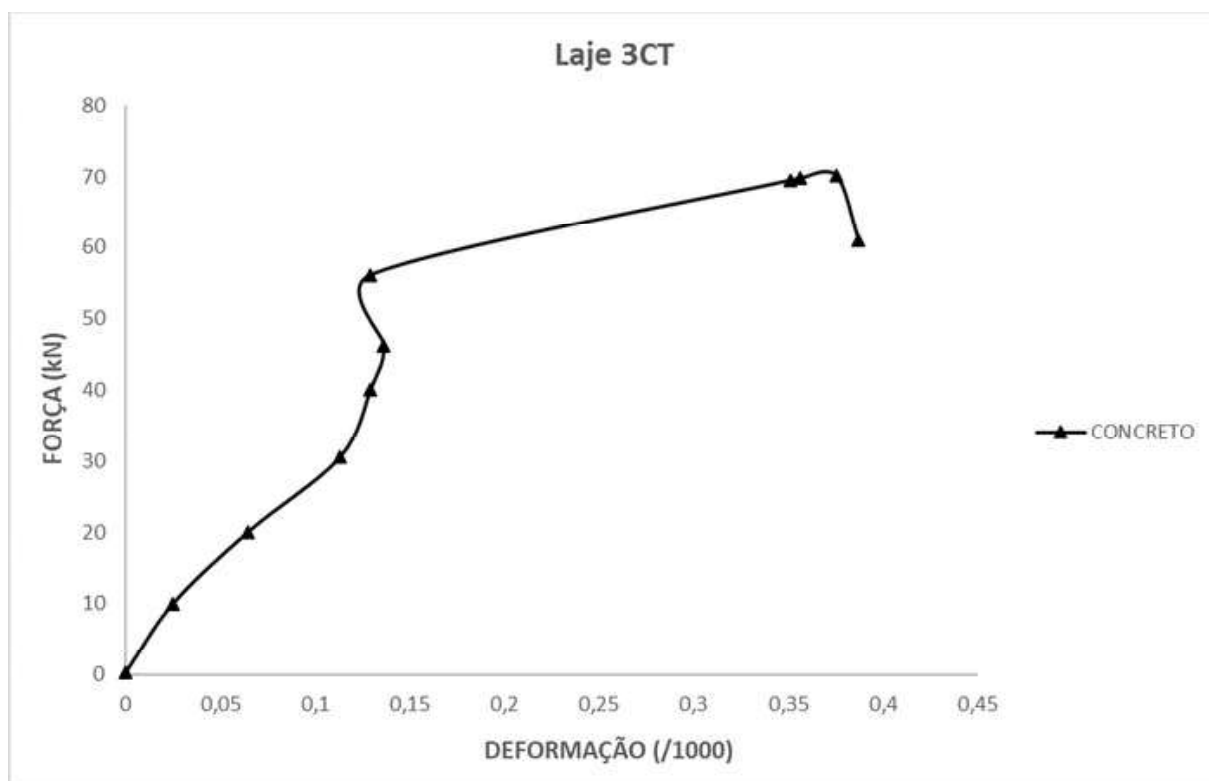
Fonte: O autor (2022).

Gráfico 13 — Força x Deformação (Laje 2ST)



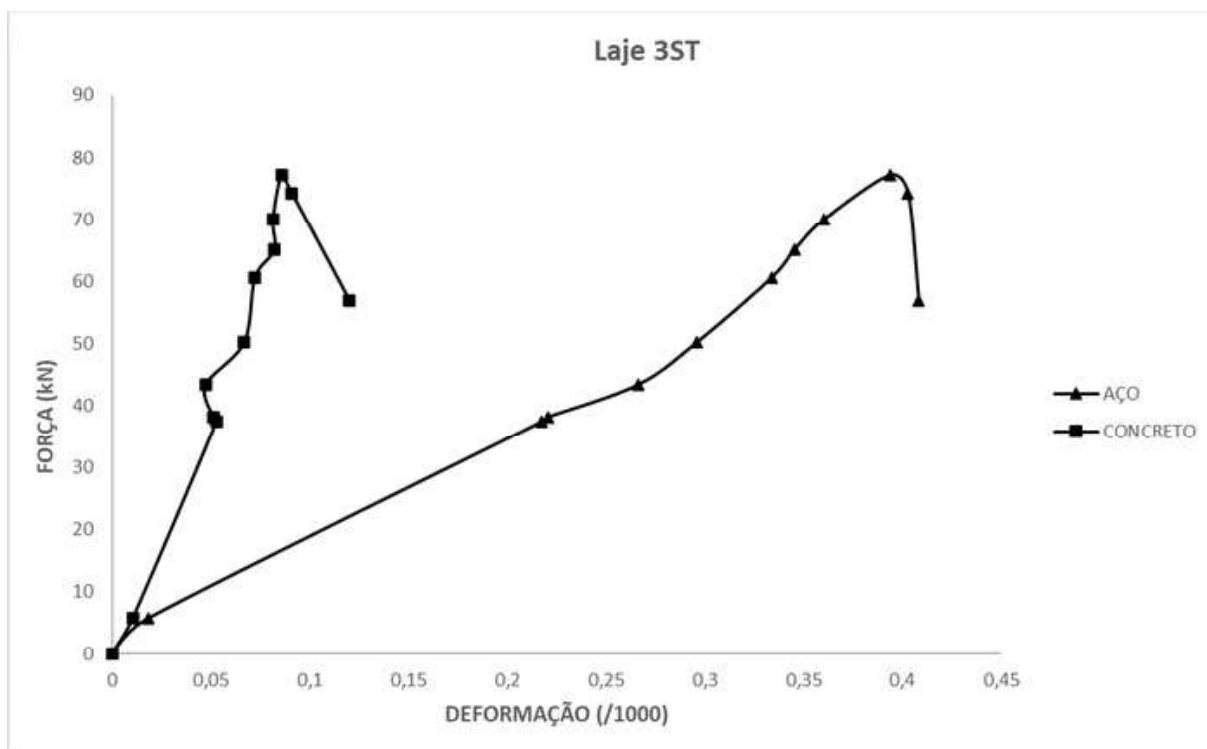
Fonte: O autor (2022).

Gráfico 14 — Força x Deformação (Laje 3CT)



Fonte: O autor (2022).

Gráfico 15 — Força x Deformação (Laje 3ST)



Fonte: O autor (2022).

Para obtenção da deformação específica de escoamento do aço, utilizou-se os dados de ensaio de tração do aço (Tabela 9). Assim, temos:

$$\varepsilon_s = \frac{f_y}{E_s} [\%] \quad (37)$$

Sendo,

ε_s , a deformação específica de escoamento do aço;

f_y , a resistência ao escoamento do aço;

E_s , o módulo de elasticidade do aço ($E_s = 210 \text{ GPa}$).

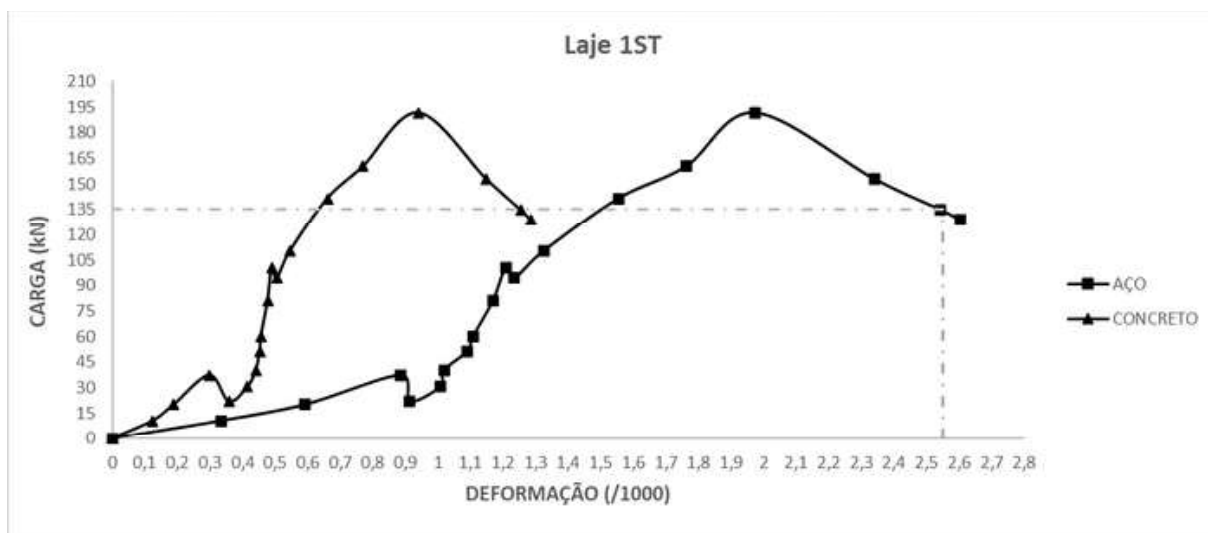
Portanto,

$$\varepsilon_s = \frac{563,25}{210000} = 2,55\% \quad (38)$$

Ao analisar os gráficos, observa-se que apenas o aço da laje 1ST (Gráfico X)

apresentou escoamento. Através do Gráfico X é possível notar uma força de aproximadamente 135 kN para ϵ_s de 2,55‰.

Gráfico 16 — Força x Deformação (Laje 1ST) (detalhado)



Fonte: O autor (2022).

6 CONCLUSÃO

O presente trabalho apresenta uma análise experimental de lajes nervuradas pré-moldadas treliçadas. A partir dos ensaios feitos em laboratório e dos dados analisados nos módulos anteriores, foram observados alguns aspectos importantes, apresentados a seguir.

As lajes, com a carga aplicada embaixo de uma vigota, entre duas vigotas, e abaixo do elemento de enchimento (EPS), apresentaram diferença significativa em sua capacidade de suporte. Além disso, observou-se que as peças 3ST e 3CT obtiveram valores muito inferiores de força de ruptura.

As lajes apresentaram aumento em suas fissuras proporcionais ao aumento da carga. Também foi possível verificar que a tela influenciou positivamente neste aspecto, haja visto que, as peças que não possuíam a mesma, apresentaram fissuras maiores para cargas semelhantes.

Além disso, foi possível constatar que a tela é mais eficiente para lajes com vigotas justapostas, pois apresentou um aumento considerável em sua capacidade de suporte. Também observou-se uma tendência em lajes de 1 vigota, apresentarem mudanças de deslocamento vertical para uma mesma carga, quando comparadas a presença ou não da tela na capa de concreto.

Todas as lajes, apesar da diferença de tensões de cisalhamento solicitantes, apresentaram ruptura por cisalhamento na direção de aplicação da força.

Por fim, conclui-se que em situações de projeto, em que a alvenaria está paralela às vigotas e apoiada na laje, é prudente que se coloque duas ou mais vigotas justapostas no local com a presença da tela, pois estaria a favor da segurança.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, ANDERSON DA ROSA. **ESTUDO TÉCNICO COMPARATIVO ENTRE PAVIMENTOS EXECUTADOS COM LAJES NERVURADAS E LAJES CONVENCIONAIS**. São Paulo, 2008 Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) - Universidade Anhembi Morumbi .

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS; **Projeto de estruturas de concreto - Procedimento**; Rio de Janeiro; 2014 (NBR 6118).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS; **Laje pré-fabricada – Pré-laje – Requisitos Parte 1: Lajes unidirecionais**; Rio de Janeiro; 2002 (NBR 14860-1).

BASTOS, Paulo Sérgio dos Santos. **FUNDAMENTOS DO CONCRETO ARMADO**. BAURÚ, 2019.

BASTOS, Paulo Sérgio dos Santos. **FUNDAMENTOS DO CONCRETO ARMADO**. 2006. 98F. NOTAS DE AULA – UNESP, BAURU –SP, 2006. Disponível em: <www.feb.unesp.br/pbastos>

FRANCA, Agemiro Brito Monteiro da; FUSCO, Péricles Brasiliense. **As lajes nervuradas na moderna construção de edifícios**. São Paulo, 1997.

GASPAR, Ricardo. **Análise da Segurança Estrutural das Lajes Pré-fabricadas na Fase de Construção**. São Paulo, 1997. 103 p Dissertação (Engenharia de Estruturas) - Universidade de São Paulo.

GERHARD, Rodrigo. **ESTUDO TEÓRICO E EXPERIMENTAL DE LAJES PRÉMOLDADAS EM PAINÉIS TRELIÇADOS**. Santa Cruz do Sul, 2016 Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) - Universidade de Santa Cruz do Sul.

NEVILLE, A. M.. **Tecnologia do Concreto - 2ed**. Bookman Editora, f. 233, 2012. 466 p.

PINHEIRO, Jorge Lucas. **AVALIAÇÃO DA DEFORMAÇÃO IMEDIATA DE LAJE NERVURADA COM VIGOTAS TRELIÇADAS PRÉ-MOLDADAS**. Cajazeiras, 2019 Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba.

PINHEIRO, Libânio Miranda. **FUNDAMENTOS DO CONCRETO E PROJETO DE EDIFÍCIOS** . São Carlos, 2007.

ANEXO A — FOTOS RUPTURA

Fotos laje 1ST



Fonte: O autor (2022)



Fonte: O autor (2022)



Fonte: O autor (2022)

Fotos laje 1CT



Fonte: O autor (2022)



Fonte: O autor (2022)

Fotos laje 2ST



Fonte: O autor (2022)



Fonte: O autor (2022)



Fonte: O autor (2022)

Fotos laje 2CT



Fonte: O autor (2022)



Fonte: O autor (2022)



Fonte: O autor (2022)

Fotos laje 3ST



Fonte: O autor (2022)



Fonte: O autor (2022)



Fonte: O autor (2022)

Fotos laje 3CT



Fonte: O autor (2022)



Fonte: O autor (2022)