

UNIVERSIDADE DE SANTA CRUZ DO SUL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

Bruna Luana Schuck Alves

**Análise Teórica e Experimental da Força Cortante em Lajes
Pré-Moldadas em Painéis Treliçados**

Santa Cruz do Sul

2026

Bruna Luana Schuck Alves

**Análise Teórica e Experimental da Força Cortante em Lajes
Pré-Moldadas em Painéis Treliçados**

Trabalho de conclusão II apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade de Santa Cruz do Sul - UNISC, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Eng. Christian Donin, Dr.

Santa Cruz do Sul

2026

Bruna Luana Schuck Alves

**ANÁLISE TEÓRICA E EXPERIMENTAL DA FORÇA CORTANTE EM
LAJES PRÉ-MOLDADAS EM PAINÉIS TRELIÇADOS**

Trabalho de conclusão II apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade de Santa Cruz do Sul - UNISC, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovada em: 09/07/2026

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Christian Donin (Orientador)

Universidade de Santa Cruz do Sul (UNISC)

Prof. Henrique Rupp

Universidade de Santa Cruz do Sul (UNISC)

Prof. Dr. Eduardo Rizzatti

Universidade Federal de Santa Maria (UFSM)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter permitido que eu tivesse determinação e forças para não desistir durante a graduação e por fazer com que os meus objetivos fossem alcançados nos meus anos de estudo.

Aos meus pais, Rudi e Miriam, a minha avó Clari, meu irmão Arthur, meu namorado, meus afilhados e aos demais familiares, por me incentivarem imensamente durante esses anos, compreendendo minha ausência por muitas vezes, e por estarem presente nos momentos mais importantes da minha vida, oferecendo incentivo e confiança para que seguisse em frente diante dos desafios.

As minhas madrinhas, agradeço por todo amor, cuidado e apoio incondicional. A presença de vocês em minha vida sempre foi motivo de força e admiração.

Ao meu professor e orientador Dr.Christian Donin, por todos os ensinamentos, ajuda e conselhos durante a graduação que me permitiram apresentar um bom desempenho no meu processo de formação profissional ao longo do curso. Além da disponibilidade em orientar o meu trabalho e me incentivar durante o processo.

Aos meus colegas de curso, com quem convivi intensamente nesses sete anos de graduação, por toda ajuda, conselhos, troca de experiências que me permitiram evoluir não só como pessoa, mas como formanda. Em especial a Raquel e a Pamela, por viverem momentos importantes da graduação comigo, sem elas a graduação não seria tão leve.

Aos meus amigos, minha sincera gratidão pelo apoio, incentivo e companheirismo durante a minha jornada acadêmica. A amizade, os momentos compartilhados e as palavras de encorajamento foram fundamentais para superar os desafios encontrados durante a trajetória. Obrigada por estarem sempre presentes nos momentos de dificuldade e por celebrarem cada conquista ao meu lado.

Agradeço também a Universidade de Santa Cruz do Sul, que foi essencial no meu processo de formação profissional, pela infraestrutura, recursos e incentivos durante minha formação acadêmica.

“A menos que modifiquemos nossa maneira de pensar, não seremos capazes de resolver os problemas causados pela forma como nos acostumamos a ver o mundo” – Albert Einstein

RESUMO

As lajes pré-moldadas com painéis treliçados são amplamente utilizadas na construção civil devido à rapidez na execução, redução de custos e facilidade construtiva. Entretanto, o comportamento desses elementos submetidos à força cortante ainda apresenta limitações quanto à representação pelos modelos teóricos de cálculo. Neste contexto, o presente trabalho teve como objetivo analisar a resistência à força cortante em lajes pré-moldadas com painéis treliçados por meio de ensaios experimentais e compará-la com os resultados obtidos através dos procedimentos de cálculo previstos na NBR 6118:2023 e as metodologias alternativas propostas.

Os resultados experimentais demonstram resistência média ao cisalhamento de 29,05kN para os protótipos sem a malha adicional e de 43,30kN para os protótipos com a malha, evidenciando um aumento de aproximadamente 49,10% na capacidade resistente proporcionado pela armadura complementar. Ao comparar os resultados experimentais com os valores calculados pela NBR 6118:2023, verificou-se que o procedimento sugerido pela norma apresentou comportamento conservador, subestimando a resistência obtida pelos ensaios. Entre os métodos alternativos analisados, o modelo que considerou uma área resistente composta pela nervura e por uma região efetiva da capa delimitada por linhas de 45° apresentou os resultados mais próximos aos valores experimentais.

Conclui-se que a capa e a mesa de concreto participam significativamente na resistência ao cisalhamento das lajes estudadas, contribuindo para uma capacidade resistente superior à prevista pelo modelo convencional da norma. Os resultados obtidos demonstram a importância da avaliação experimental para a compreensão do comportamento estrutural desses elementos.

Palavras-chave: lajes pré-moldadas; painéis treliçados; força cortante; cisalhamento; concreto armado; ensaio experimental.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Carregamentos e Dimensões de uma laje	13
Figura 2 - Laje Maciça.....	14
Figura 3 - Laje Nervurada	15
Figura 4 - Laje Cogumelo.....	15
Figura 5 - Laje Lisa	16
Figura 6 - Seções das Vigotas	18
Figura 7 - Laje pré-moldada com Vigotas Trelaçadas	18
Figura 8 - Características da Vigota	20
Figura 9 - Seção Típica Armadura	21
Figura 10 - Elementos de Enchimento	22
Figura 11 - Trajetórias tensões principais viga biapoada	26
Figura 12 - Componentes de tensão nos eixos principais e em x e y	27
Figura 13 - Fissuração por flexão e força cortante	28
Figura 14 - Trelça para armadura transversal inclinada.....	29
Figura 15 - Trelça para armadura transversal a 90°	29
Figura 16 - Viga segundo trelça de Ritter-Morch	30
Figura 17 - Modelo trelça generalizada	33
Figura 18 - Viga sem armadura de cisalhamento ruptura por cortante-flexão	37
Figura 19 - Esquema Longitudinal Laje Sem Malha	44
Figura 20 - Esquema Longitudinal Laje Com Malha	44
Figura 21 - Amarração das trelças com barra adicional de 12,5mm	45
Figura 22 - Posicionamento Trelças	46
Figura 23 - Forma das lajes	46
Figura 25 - Protótipos finalizados	47
Figura 26 - Aparelho de ensaio módulo de elasticidade	49
Figura 29 - Corpo de prova rompido por compressão	51
Figura 30 - Ensaio de tração nas barras	53
Figura 31 - Aparelho de ensaio dos protótipos	54
Figura 32 - Esquema de ensaio para análise da resistência	55
Figura 33 - Preparação do ensaio	56
Figura 34 - Protótipo rompido.....	56
Figura 35 - Método de cálculo 1 protótipo sem a malha	59
Figura 36 - Método de cálculo 2 protótipo sem a malha	59

Figura 37 - Método de cálculo 3 protótipo sem malha	60
Figura 39 - Método de cálculo 1 protótipo com malha	61
Figura 40 - Método de cálculo 2 protótipo com malha	62
Figura 41 - Método de cálculo 3 protótipo com malha	62
Figura 42 - Método de cálculo 4 protótipo com malha	63
Figura 43 - Ruptura protótipo laje L1	72
Figura 44 - Ruptura protótipo laje L2	72
Figura 45 - Ruptura protótipo laje L3	73
Figura 46 - Ruptura protótipo laje LM1	73
Figura 47 - Ruptura protótipo laje LM2	74
Figura 48 - Ruptura protótipo laje LM3	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dimensões e tolerância padronizadas para vigotas treliçadas	20
Tabela 2 - Diâmetro nominal mínimo do fio ou barra de aço no banzo superior	21
Tabela 3 - Resumo equações para treliças clássicas em função do ângulo α de inclinação das diagonais tracionadas	30
Tabela 4 - Módulo de elasticidade estático e dinâmico mesa	49
Tabela 5 - Módulo de elasticidade estático e dinâmico capa	49
Tabela 6 - Resultado ensaio de compressão CP's mesa	51
Tabela 7 - Resultado ensaio de compressão CP's capa	52
Tabela 8 - Resultado ensaio tração barra de 12,5mm	53
Tabela 9 - Resultado ensaio tração barra de aço da treliça 4,2mm	53
Tabela 10 - Resultado ensaio de tração barra de aço malha 6,3mm	54
Tabela 11 - Resultado dos ensaios protótipos lajes sem malha adicional	64
Tabela 12 - Resultado dos ensaios protótipo laje com malha adicional	65
Tabela 13 - Resultados obtidos nos diferentes métodos de cálculo	66

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Resultado dos ensaios protótipo laje sem malha adicional	64
Gráfico 2 - Resultado dos ensaios protótipos laje com malha adicional	65
Gráfico 3 - Relação entre resultados teóricos e resultados experimentais do protótipo de laje sem malha adicional	67
Gráfico 4 -Desvio em % dos resultados experimentais e métodos de cálculo do protótipo de laje sem malha adicional	68
Gráfico 5 - Relação entre resultados teóricos e resultados experimentais do protótipo de laje com malha adicional	69
Gráfico 6 - Desvio em % dos resultados experimentais e métodos de cálculo do protótipo de laje com a malha adicional	70

LISTA DE ABREVIATURAS

A_s	Área de aço
b_w	Largura da seção
cm	Centímetros
d	Altura útil
f_{cd}	Resistência de cálculo do concreto à compressão
f_{ck}	Resistência característica do concreto à compressão
f_{ct}	Resistência do concreto à tração
f_{yk}	Resistência característica do aço ao escoamento
m	Metros
M_d	Momento fletor solicitante de cálculo
$M_{máx}$	Momento fletor máximo
MPa	Mega Pascal
V_{exp}	Força cortante experimental
$V_{est, rup}$	Força cortante estimada de ruptura
$VRd1$	Força cortante resistente de cálculo
$VRd2$	Força cortante resistente de cálculo, relativa à ruína das diagonais comprimidas de concreto
V_{sd}	Força cortante de cálculo
V_{u1}	Força cortante relativa à compressão oblíqua da nervura
$V_{r, est, rup}$	Força cortante estimada de ruptura

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	10
2. JUSTIFICATIVA.....	11
3. OBJETIVOS.....	11
3.1. Objetivos gerais	11
3.2. Objetivos Específicos.....	11
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	12
4.1. Introdução às lajes	12
4.2. Classificação.....	13
4.2.1. Quanto à forma	13
4.2.2. Quanto à direção	13
4.2.3. Quanto à natureza	14
4.2.4. Quanto aos apoios.....	18
4.3. Lajes Pré-Moldadas treliçadas	19
4.3.1. Vigotas Treliçadas	19
4.3.2. Armadura treliçada eletrossoldada.....	20
4.3.3. Fios e barras de aço	21
4.3.4. Elementos de Enchimento	22
4.4. Ações a considerar	22
4.4.1. Ações Permanentes.....	22
4.4.2. Ações Variáveis	23
4.4.3. Ações na laje	23
4.4.1. Momentos Fletores	24
4.4.2. Módulo de elasticidade	25
4.4.3. Flexão de lajes com nervuras unidirecionais contínuas	25
4.5. Força cortante.....	26
4.5.1. Treliça Clássica de Ritter-Morch ($\theta = 45^\circ$)	28
4.5.2. Modelo de cálculo 1	31

4.5.3.	Treliça Generalizada θ variável.....	32
4.5.4.	Modelo de cálculo II	35
4.5.5.	Tensão de cisalhamento da alma no estágio II	36
4.6.	Rupturas por força cortante	36
4.6.1.	Ruptura por cortante-flexão	37
4.6.2.	Ruptura por cortante-tração	37
4.6.3.	Ruptura das diagonais de compressão	38
4.6.4.	Ruptura por falha de ancoragem.....	38
4.7.	Força cortante em lajes pré-moldadas	39
4.7.1.	Lajes sem armadura transversal	39
4.7.2.	Lajes com armadura transversal	41
4.8.	Cisalhamento conforme EF-96 em lajes nervuradas pré-moldadas	41
5.	METODOLOGIA	43
5.1.	Definição dos protótipos.....	43
5.2.	Confecção dos protótipos	44
5.3.	Materiais	45
5.3.1.	Concreto da mesa, nervura e capa	45
5.3.2.	Aço da nervura e malha	45
5.3.3.	Execução dos protótipos.....	46
5.4.	Ensaio.....	48
5.4.1.	Ensaio do módulo de elasticidade dinâmico do concreto	48
5.4.2.	Ensaio de compressão nos corpos de prova de concreto	50
5.4.3.	Ensaio de tração em barras de aço	52
5.5.	Análise experimental.....	54
5.5.1.	Procedimento de ensaio dos protótipos	54
5.5.2.	Preparação dos protótipos para realização do ensaio.....	55
5.6.	Análise Experimental	57
5.7.	Análise teórica	57

5.7.1.	Forças cortantes estimadas de ruptura	57
6.	RESULTADOS.....	64
6.1.	Resultados Experimentais	64
6.2.	Resultados teóricos	65
7.	ANÁLISE DOS RESULTADOS	67
7.1.	Análise dos resultados de ruptura experimentais por força cortante nas lajes treliçadas sem a malha comparadas aos demais resultados.....	67
7.2.	Análise dos resultados de ruptura experimentais por força cortante nas lajes treliçadas com a malha adicional comparadas aos demais resultados	69
7.3.	Modo de ruptura dos protótipos	71
7.3.1.	Modo ruptura dos protótipos sem a malha adicional	72
7.3.2.	Modos ruptura dos protótipos com malha adicional	73
8.	CONCLUSÃO	75
	REFERÊNCIAS	77

1. INTRODUÇÃO

O uso de sistemas construtivos industrializados, especialmente os elementos pré-fabricados, tem ganhado cada vez mais espaço no setor da construção civil, principalmente pela busca por maior produtividade, padronização, controle de qualidade e redução de desperdícios. Dentre esses sistemas, destaca-se o uso de lajes pré-moldadas com painéis treliçados, cuja aplicação é recorrente em edificações residenciais, comerciais e industriais devido à sua facilidade de execução e boa relação custo-benefício.

As lajes treliçadas são compostas por painéis de concreto pré-moldado com armaduras eletrossoldadas em forma de treliça, que funcionam como forma e parte resistente da laje, e posteriormente são completadas com concreto moldado no local. Um dos aspectos críticos no dimensionamento dessas lajes refere-se à resistência à força cortante. Esse esforço, muitas vezes subestimado, é responsável por falhas estruturais que podem ocorrer de forma abrupta, tornando sua análise indispensável (BASTOS, 2025). De acordo com a NBR 6118:2023, o dimensionamento à força cortante deve considerar os mecanismos de ruptura por cisalhamento e o comportamento da estrutura em estados-limite últimos, respeitando critérios rigorosos de segurança e desempenho.

A força cortante em lajes treliçadas se distribui de forma complexa devido à interação entre o concreto pré-moldado, o concreto moldado in loco e as armaduras, exigindo um entendimento aprofundado do comportamento estrutural do sistema. Araújo (2014) destaca que, em sistemas nervurados ou com painéis treliçados, é essencial garantir a continuidade das armaduras e a correta ancoragem dos elementos para assegurar a resistência aos esforços cisalhantes.

Diante desse contexto, o presente trabalho tem como objetivo principal realizar uma análise da força cortante em lajes pré-moldadas com painéis treliçados, considerando os critérios normativos atuais, estudos teóricos e aplicações práticas. A pesquisa visa contribuir para a compreensão do comportamento estrutural desses elementos.

2. JUSTIFICATIVA

O uso de sistemas pré-moldados na indústria da construção civil tem se mostrado uma alternativa eficiente na otimização do tempo de execução das obras, redução de custos e garantia de uniformidade na produção dos elementos estruturais. Desse modo, as lajes pré-moldadas em painéis treliçados veem sendo amplamente empregadas em edificações residenciais, comerciais e industriais, devido a facilidade de montagem e o desempenho estrutural.

Apesar da ampla aplicação desse modelo de laje, observa-se que a compreensão dos esforços internos, especialmente da força cortante, é um ponto que exige uma atenção mais detalhada pelos profissionais e estudantes da área. Além de ser um dos esforços que influencia no dimensionamento da laje, a força cortante, se mal analisada pode comprometer o comportamento estrutural do elemento. Assim, compreender como esses esforços se distribuem e agem sobre as lajes, principalmente em lajes treliçadas é essencial para garantir a estabilidade e segurança das construções.

A relevância desse trabalho reside na necessidade de aprofundar o entendimento teórico e prático acerca da resistência à força cortante em lajes pré-moldadas em painéis treliçados, buscando relacionar conceitos normativos e os ensaios feitos em laboratório, assim, contribuindo para o aprimoramento técnico garantindo qualidade e segurança nas peças estruturais.

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivos gerais

Analisar os critérios de resistência ao cisalhamento em lajes nervuradas pré-moldadas em painéis treliçados, através da análise de modelos de cálculos e ensaios realizados em laboratório.

3.2. Objetivos Específicos

- Analisar as normas vigentes ao modelo a ser estudado;
- Confeccionar os corpos de provas das lajes a serem ensaiadas, e realizar os ensaios em laboratório;

- Comparar parâmetros entre resultados experimentais e teóricos;
- Apresentar conclusões acerca do modelo estudado e sua aplicação.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1. Introdução às lajes

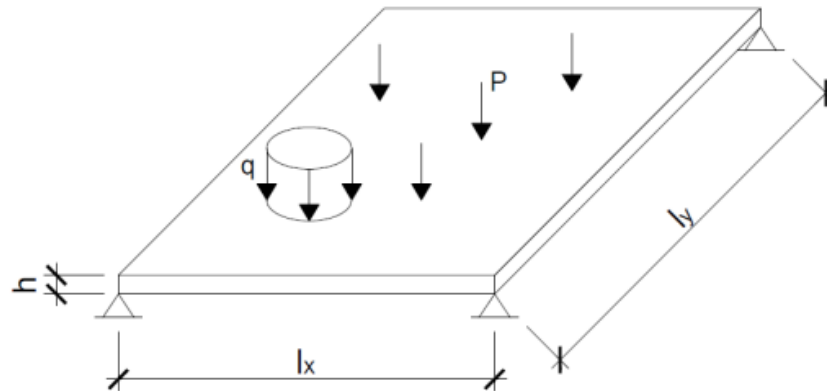
Conforme Carvalho e Figueiredo Filho (2014), o concreto é um material composto por água cimento e agregado. E, para fins de utilização estrutural é um material que resiste bem à compressão, porém, possui baixa resistência à tração. Portanto, se faz necessário o uso associado de um material mais deformável e com resistência alta à tração, nesse caso, sendo mais comum o uso do aço, utilizado normalmente na região onde há tração na peça estrutural.

Tal combinação resulta-se no concreto armado, onde devido a boa aderência do conjunto concreto/aço a armadura absorve as forças de tração, evitando assim, o colapso da estrutura. Dentro das construções em concreto armado há três elementos estruturais que se destacam: lajes, vigas e os pilares.

As lajes são elementos estruturais planos responsáveis por receber as cargas atuantes nas edificações e distribuí-las às vigas, que, por sua vez, as transferem aos pilares e, conseqüentemente, à fundação da estrutura. São normalmente peças horizontais, onde uma de suas dimensões é menor comparada às demais. E, conforme a NBR 6118:2023, são elementos de superfície plana, que estão sujeitas a ações normais sobre o seu plano, não podendo ultrapassar 1/3 do seu vão.

Segundo Bastos (2023), normalmente as cargas nas lajes são perpendiculares ao plano, podendo ser divididas e distribuídas na área, linearmente ou forças concentradas. E, ainda em casos menos comuns, podem ocorrer ações externas em forma de momento fletores, aplicados normalmente nas bordas das lajes. Onde as cargas são transmitidas para as vigas de apoio na borda da laje, e eventualmente podendo ser transmitida diretamente aos pilares, quando lajes lisas ou sem capitel. A Figura 1, retrata bem a composição de cargas descritas acima atuando em uma laje.

Figura 1 - Carregamentos e Dimensões de uma laje



Fonte: Adaptado de Araújo, 2014.

Os tipos mais comuns de laje são maciças e nervuradas. “Lajes nervuradas são as 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” (ABNT, NBR 6118:2023).

Contudo, ao considerar o uso de lajes pré-fabricadas garante-se uma padronização na fabricação das peças estruturais, as vigotas, assim, tendo mais qualidade e segurança. No decorrer do trabalho, destacam-se as lajes pré-fabricadas com vigotas treliçadas.

4.2. Classificação

4.2.1. Quanto à forma

A determinação do tipo de formato das lajes é definida através da solicitação de cada projeto arquitetônico, onde as mesmas podem ser: quadradas, retangulares, triangulares octogonais, em formatos T, L, Z, ou ainda lajes elípticas, circulares ou anelares.

4.2.2. Quanto à direção

Conforme as notas de aula Donin (2024), as lajes retangulares podem ser classificadas quanto a sua armação, podendo ser armada em uma só direção e em duas direções.

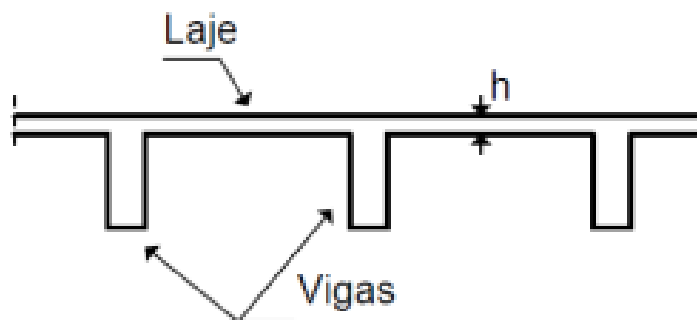
- a) **Armada em uma direção:** onde a relação entre o maior vão e menor vão são superiores a dois. Então, concluindo que a menor dimensão é a que vai resistir as forças ocasionadas pelo carregamento, pois o momento fletor no vão maior pode ser desprezado. Assim, podendo adotar somente uma armadura de distribuição nessa direção.
- b) **Armada em duas direções:** conhecida também como armação em cruz, são lajes onde a relação vão maior e vão menor são menores que dois. Portanto, possuem cargas atuando em ambas as direções, assim sendo necessário o uso da armadura em ambas.

4.2.3. Quanto à natureza

Segundo Donin (2007), as lajes podem ser diferenciadas quanto a natureza através da maneira a qual ela foi executada e os materiais que foram utilizados na sua confecção, sendo classificadas em:

- a) **Lajes maciças:** são placas constituídas por concreto armado ou protendido, possuindo espessura uniforme (Figura 2) construídas através de formas de madeira ou metálica, que são retiradas após a cura do concreto. É o modelo mais utilizado em edificações e obras de arte, porém devido ao peso próprio não consegue vencer grandes vãos;

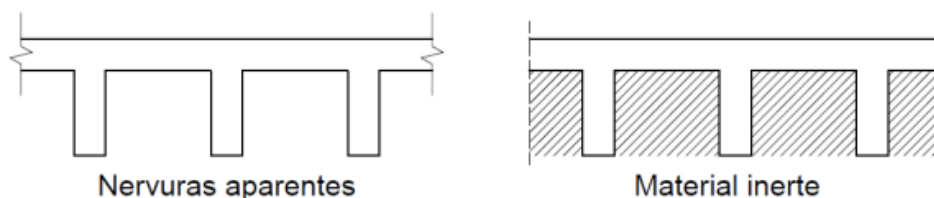
Figura 2 - Laje Maciça



Fonte: Araújo (2014).

b) **Lajes nervuradas:** composta por uma mesa de concreto na região comprimida e por nervuras na região tracionada, proporcionando um uso mais eficiente tanto do concreto quanto do aço. As nervuras costumam ficar aparentes, exceto quando se utiliza um material inerte entre elas, com o objetivo de obter uma superfície inferior plana, como mostrado na Figura 3. Entre os materiais mais comuns empregados nesse preenchimento estão os blocos cerâmicos e o EPS. Devido a essa configuração, a laje nervurada apresenta menor peso em comparação à laje maciça, sendo, portanto, uma solução indicada para vencer grandes vãos, geralmente superiores a 8 metros.

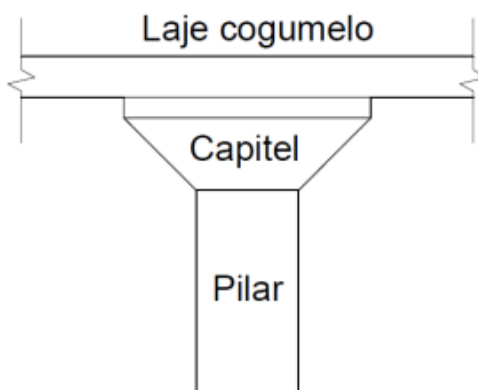
Figura 3 - Laje Nervurada



Fonte: Adaptado de Araújo, 2014.

c) **Laje cogumelo:** as lajes cogumelos são lajes que se apoiam diretamente nos pilares, sem apoios em paredes e vigas como as lajes maciças. Sua ligação com o pilar é feita através da estrutura chamada capitel, assim como pode ser visto na Figura 4, o capitel é um aumento na seção do pilar com a finalidade de redução do efeito de punção;

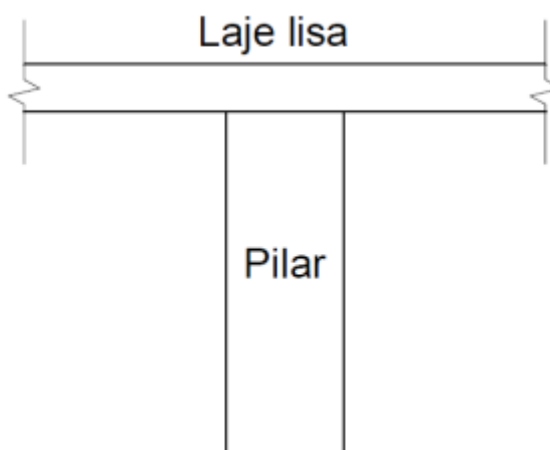
Figura 4 - Laje Cogumelo



Fonte: Adaptado de Araújo, 2014.

- d) **Lajes lisas:** o termo laje lisa refere-se as lajes apoiadas diretamente nos pilares, assim como as lajes cogumelos, porém sem o uso do capitel para ligação entre os elementos estruturais laje e pilar, como na Figura 5.

Figura 5 - Laje Lisa



Fonte: Adaptado de Araújo, 2014.

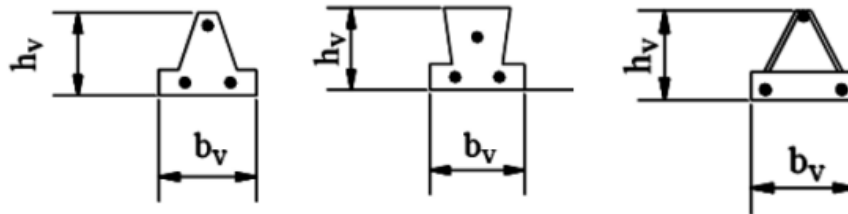
- e) **Lajes mistas:** as lajes mistas possuem características semelhantes às lajes nervuradas, porém o espaço entre as nervuras é preenchido com material cerâmico, que contribui parcialmente para a resistência mecânica da laje, especialmente na região comprimida. Diferentemente da laje nervurada, nas lajes mistas não é obrigatória a execução de uma mesa de concreto na parte comprimida, desde que os blocos cerâmicos utilizados sejam de boa qualidade. O revestimento é aplicado diretamente sobre as nervuras ortogonais de concreto e sobre a superfície superior dos blocos cerâmicos, garantindo um acabamento uniforme.
- f) **Lajes em grelha:** são uma variação das lajes nervuradas, caracterizadas por nervuras mais altas e espaçadas, com distância entre elas geralmente superior a 1 metro. Nessa tipologia, não se utiliza material de enchimento, como blocos cerâmicos ou EPS, deixando as vigas aparentes — salvo quando há a aplicação de forro falso. O dimensionamento da capa de concreto deve

considerar a possibilidade de punção causada por cargas concentradas. O cálculo estrutural é realizado de forma semelhante ao das lajes maciças, mas o vigamento é analisado como uma grelha. Esse tipo de laje é amplamente empregado em edificações industriais e comerciais, devido à sua capacidade de vencer grandes vãos.

g) Lajes duplas: Segundo Donin (2007), as lajes duplas podem ser consideradas uma variação das lajes nervuradas ou das lajes em grelha, e, em alguns casos, também das lajes maciças. Esse tipo de laje é composto por duas camadas de concreto — uma superior, que trabalha à compressão, e outra inferior, apoiada sobre vigas ou nervuras de concreto. Tradicionalmente, eram utilizadas em pavimentos de transição e em fundações de edifícios, especialmente em estruturas que demandavam elevada resistência. No entanto, de acordo com o autor, atualmente esse sistema estrutural está praticamente em desuso, sendo empregado apenas em situações específicas.

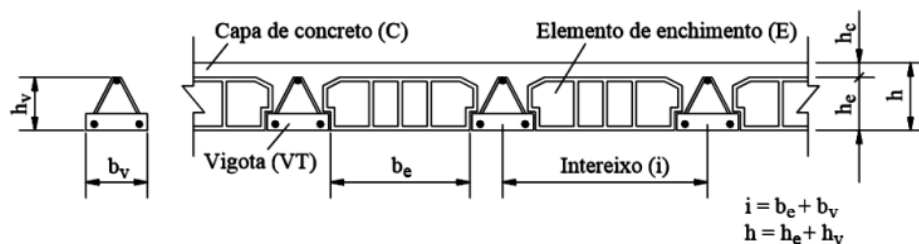
h) Laje pré-fabricada: Conforme Donin (2007), as lajes pré-fabricadas são constituídas por um conjunto de vigotas (Figura 6) — nervuras de concreto armado ou protendido — associadas a blocos cerâmicos ou de concreto, também conhecidos como tabelas. Essas peças são unidas por uma capa de concreto moldada in loco, responsável por resistir aos esforços de compressão. As lajes pré-fabricadas podem ser unidirecionais, quando possuem nervuras principais longitudinais em uma única direção, ou bidirecionais, quando há nervuras cruzadas executadas durante a montagem, resultando em um sistema de distribuição de cargas em duas direções. Ainda segundo Donin (2007), as nervuras de concreto podem ser armadas de forma convencional ou por meio de treliças metálicas, originando as chamadas lajes treliçadas (Figura 7). Dentre as principais vantagens desse sistema estão a facilidade e rapidez de execução, a redução do consumo de escoramentos e o menor peso próprio da estrutura. Há, também, a variação denominada laje pré-fabricada alveolar, composta por painéis de concreto com vazios longitudinais, utilizada principalmente em pisos e coberturas de edificações industriais.

Figura 6 - Seções das Vigotas



Fonte: Silva, 2005.

Figura 7 - Laje pré-moldada com Vigotas Treliçadas



Fonte: Silva, 2005.

4.2.4. Quanto aos apoios

De acordo com Donin (2007), as lajes de concreto podem ser classificadas quanto às condições de apoio, ou seja, conforme o caminho percorrido pelas cargas até os pontos de sustentação da estrutura. Essa classificação distingue dois tipos principais de apoio: contínuo e discreto.

- a) Apoio contínuo:** o apoio contínuo ocorre quando a laje está apoiada sobre uma linha contínua, formada por elementos como alvenarias, paredes de concreto, vigas de sustentação de concreto armado ou protendido, estruturas metálicas ou de madeira. Nesse caso, todos os bordos da laje podem estar apoiados, ou apenas parte deles, podendo haver um ou mais bordos livres.

- b) Apoio discreto:** acontece quando a laje é sustentada diretamente sobre pilares, recebendo a denominação de laje cogumelo ou laje plana. Esse tipo de laje pode ser subdividido em três variações, de acordo com a existência ou não de reforço no capitel e sua forma de ligação com o pilar: laje cogumelo com capitel aparente, com capitel invertido ou sem capitel.

4.3. Lajes Pré-Moldadas treliçadas

As lajes pré-moldadas são um sistema construtivo composto por vigotas de concreto armado e material de preenchimento, podendo ele ser de EPS ou cerâmico, nesse modelo é possível eliminar boa parte do concreto que ficaria abaixo da linha neutra, região que mais sofre com esforços de tração, com isso garante uma grande economia de material.

Vários estudos demonstram que o sistema de lajes pré-moldadas com vigotas treliçadas oferece vantagens técnicas e econômicas relevantes. Por exemplo, Figueiredo Filho & Shiramizu (2011) apontam que esse tipo de laje reduz o consumo de materiais e de mão de obra, além de agilizar a execução, proporcionar versatilidade de aplicação e aliviar o peso próprio da estrutura.

Um estudo recente de otimização estrutural conduzido por Ferreira, Lima e Delalibera (UFU) analisou vigotas treliçadas com e sem protensão, buscando minimizar o peso próprio da laje e atender aos limites de deformação segundo a norma NBR 6118:2023. Os autores concluíram que o uso adequado desses sistemas permite vãos maiores, cargas elevadas e economia no uso de concreto e aço.

Além disso, empresas do setor relatam que lajes treliçadas apresentam menor peso próprio em comparação às lajes maciças, o que alivia cargas sobre vigas, pilares e fundações, além de permitir redução do uso de formas e escoramentos no canteiro de obras.

Também se destaca a melhora na praticidade para embutido de instalações hidráulicas e elétricas, e melhora no desempenho térmico e acústico quando se utiliza material inerte como EPS no enchimento entre as vigotas.

4.3.1. Vigotas Treliçadas

A vigota é caracterizada conforme a NBR 14859-1:2016 como um elemento estrutural pré-fabricado, composto por concreto estrutural e armadura treliçada

eletrossoldada, em conformidade com a NBR 14859-3:2022. Esse elemento é projetado para alojar, quando requerido, armadura passiva inferior de tração (fios e/ou barras), conforme as exigências do projeto estrutural. Sua geometria e demais características construtivas estão representadas na Figura 8, sendo as dimensões e tolerâncias estabelecidas conforme os parâmetros especificados em tabela normativa (Tabela 1).

Figura 8 - Características da Vigota



Fonte: Armatrel, 2019.

Tabela 1 - Dimensões e tolerância padronizadas para vigotas treliçadas

Dimensões em milímetros

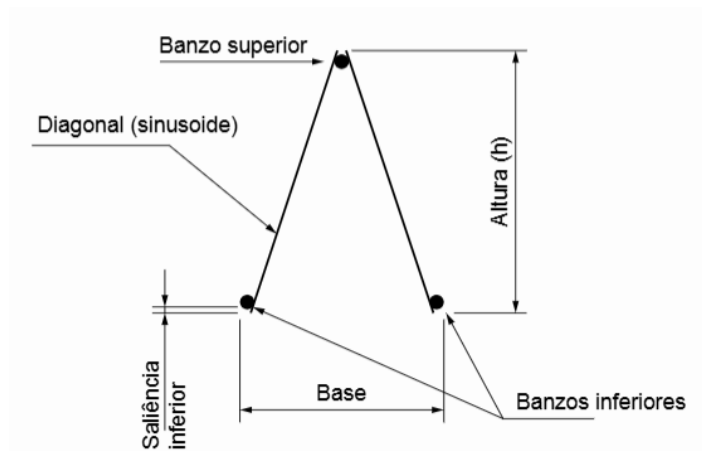
Largura mínima (bv)	Altura mínima (hv)	Largura mínima do apoio (ap)	Altura mínima do apoio (hb)
130 +- 5	75 +- 2	15 +- 1	30 +- 1

Fonte: NBR 14859-1:2016.

4.3.2. Armadura treliçada eletrossoldada

Elemento estrutural fabricado de aço, utilizado nas lajes pré-moldadas, principalmente em lajes treliçadas com vigotas. Segundo a NBR 14859-3:2024 é uma armadura constituída por dois fios ou barras de aço paralelos na base (banzo inferior) e um fio ou barra de aço longitudinal na parte superior (banzo superior). Esses elementos são interligados por eletrofusão (caldeamento) a duas barras diagonais contínuas, dispostas de forma sinusoidal e com espaçamento regular (passo), o que garante a uniformidade e o comportamento estrutural adequado da peça. Conforme a Figura 9.

Figura 9 - Seção Típica Armadura



Fonte: NBR 14859-3:2024.

A eletrossoldagem utilizada na fabricação das treliças, assegura ligações precisas e resistentes, eliminando a necessidade de amarrações manuais e garantindo padronização na execução.

4.3.3. Fios e barras de aço

Conforme a NBR 14859-3:2024, os fios e barras a serem utilizados na fabricação de armaduras treliçadas eletrossoldadas devem atender as especificações da NBR 7480, exceto a categoria CA-25, que não pode ser utilizada para a fabricação desse tipo de armadura. A norma ainda determina que no banzo inferior só devem ser permitidos os fios ou barras de aço nervurados ou entalhados, e para o banzo superior os fios ou barra devem ter diâmetro mínimo nominal conforme a tabela normativa (Tabela 2).

Tabela 2 - Diâmetro nominal mínimo do fio ou barra de aço no banzo superior

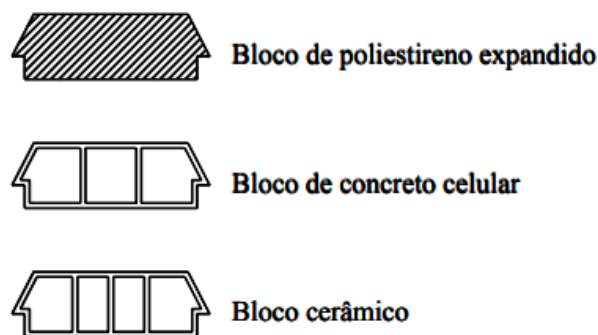
Altura da armadura treliçada	Diâmetro nominal mínimo mm
De 60 a 130	6,0
De 131 a 225	7,0
De 226 a 300	8,0

Fonte: NBR 14859-3:2024.

4.3.4. Elementos de Enchimento

Segundo Silva (2005), são componentes pré-fabricados com materiais inertes de vários tipos: EPS (isopor), cerâmico, concreto ou do tipo caixão. Ambos são capazes de resistir às forças causadas pela movimentação durante a execução e concretagem e, devido ao seu peso próprio ser baixo, acaba servindo como forma para o concreto complementar, assim como exemplos na Figura 10.

Figura 10 - Elementos de Enchimento



Fonte: Silva, 2005.

4.4. Ações a considerar

A NBR 6118:2023 sugere que para a análise estrutural deve ser considerada a influência de todas as ações que possam possuir efeitos significativos para a segurança da estrutura. Tais ações são classificadas como: permanentes, variáveis e excepcionais.

4.4.1. Ações Permanentes

São valores constantes que permanecem durante toda a vida da construção, podendo aumentar com o tempo, tendendo a um valor-limite constante. Composta por ações permanentes diretas que são: peso próprio da estrutura, pesos de elementos construtivos fixos, das instalações permanentes e dos empuxos permanentes.

E, também constituída por ações permanentes indiretas, que são as deformações impostas por retração e fluência do concreto, deslocamentos de apoio, imperfeições geométricas e protensão.

4.4.2. Ações Variáveis

Constituídas por ações variáveis diretas e indiretas, onde as ações variáveis diretas são as cargas acidentais previstas para a utilização da edificação e pela ação do vento e água, e as variáveis indiretas são as cargas compostas por variações uniformes e não uniformes de temperatura, e ações dinâmicas e excepcionais.

4.4.3. Ações na laje

Segundo Bastos (2023), as ações ou carregamentos que atuam sobre as lajes são diversos, abrangendo desde o peso de pessoas, móveis e equipamentos, fixos ou móveis, até elementos como paredes, divisórias, água e solo. As lajes têm a função de receber essas cargas de utilização e transmiti-las aos apoios, normalmente vigas localizadas nas bordas.

Nos edifícios, além de suportar cargas verticais, as lajes também atuam como diafragmas rígidos, ou seja, elementos com rigidez praticamente infinita em seu próprio plano, responsáveis por distribuir as forças horizontais, como as provocadas pelo vento, para os elementos de contraventamento — pórticos, paredes estruturais e núcleos de rigidez —, que garantem a estabilidade global da estrutura.

A determinação das ações atuantes deve seguir os critérios definidos pelas normas técnicas brasileiras, principalmente a NBR 6118:2023, NBR 8681:2003 e NBR 6120:2019, que devem ser avaliadas com atenção. Em casos de cargas específicas não abordadas por essas normas, pode-se recorrer a normas estrangeiras, à bibliografia especializada ou às especificações de fabricantes de equipamentos e máquinas.

Nas lajes de edificações usuais, as ações mais relevantes a serem consideradas são as permanentes (g) e as variáveis (q). Entre as ações permanentes diretas, destacam-se o peso próprio da estrutura, os revestimentos e o peso de elementos fixos incorporados à laje. Composto assim, a carga P_k :

$$P_k = g + q \quad (1)$$

Onde:

g – Carga permanente

q – Carga de uso, chamada também de carga acidental, estipulada pela tabela 10 da NBR 6120:2023, alterando conforme a finalidade de uso da edificação.

4.4.1. Momentos Fletores

De acordo com Carvalho e Figueiredo Filho (2014), o momento fletor máximo em uma nervura de laje pré-moldada simplesmente apoiada pode ser determinado a partir da Equação 2, obtida com base em uma análise comparativa entre os diagramas de momentos fletores da região central de lajes maciças, lajes nervuradas e do elemento isolado correspondente.

Dessa forma, para lajes armadas em uma única direção, simplesmente apoiadas e submetidas a carregamento uniformemente distribuído, o momento fletor máximo pode ser calculado considerando o elemento isolado, procedimento que favorece a segurança no dimensionamento estrutural.

$$M_{m\acute{a}x} = \frac{p \cdot l^2}{8} \quad (2)$$

Donin (2024), indica além da Equação 2 outras duas equações para determinar o momento máximo nos outros tipos de apoio, Equação 3 e 4.

Laje armada em uma direção com apoio simples e engaste perfeito com o carregamento uniforme:

$$M_{m\acute{a}x} = \frac{p \cdot l^2}{14,22} \quad (3)$$

Laje armada em uma direção biengastada com carregamento uniforme:

$$M_{m\acute{a}x} = \frac{p \cdot l^2}{24} \quad (4)$$

Onde:

p – carregamento;

l – vão.

4.4.2. Módulo de elasticidade

Segundo a NBR 6118:2023, o módulo de elasticidade necessário para determinar a flecha imediata, é obtido pela Equação 5:

$$E_{CS} = \alpha_i \cdot E_{ci} \quad (5)$$

Onde α_i calculado pela Equação 6:

$$\alpha_i = 0,8 + 0,2 \frac{fck}{80} \leq 1,0 \quad (6)$$

E, considerando a idade de 7 a 28 dias, estimativa de módulo de elasticidade do concreto E_{ci} :

Para concretos com $fck \leq 50\text{Mpa}$:

$$E_{ci} = \alpha_E \cdot 5600 \sqrt{fck} \quad (7)$$

E, para concretos com $fck > 50\text{Mpa}$:

$$E_{ci} = 21,5 \times 10^3 \cdot \alpha_E \cdot \left(\frac{fck}{10} + 1,25 \right)^{\frac{1}{3}} \quad (8)$$

Onde: α_E -0,7 para arenito; α_E 0,9 para calcário; α_E 1,0 para granito e gnaiss; α_E 1,2 para basalto e diabásio.

4.4.3. Flexão de lajes com nervuras unidirecionais contínuas

As lajes nervuradas apresentam nervuras com seção transversal em formato de “T”. Em sistemas de lajes contínuas, a capacidade resistente aos momentos positivos é superior à resistência aos momentos negativos. Segundo Carvalho e Figueiredo (2014), isso ocorre porque, na região tracionada inferior, a área comprimida é constituída somente pela nervura, que possui uma seção de concreto significativamente menor quando comparada à porção superior da laje, assim sendo necessário a compatibilização dos momentos, também chamados de momentos de plastificação.

Para seções resistentes ao momento solicitado, usa-se a Equação 9:

$$X_{elástico} = \frac{pl^2}{8} \quad (9)$$

Onde:

$X_{elástico}$ – Momento negativo do apoio intermediário do diagrama elástico;

p – Carga aplicada;

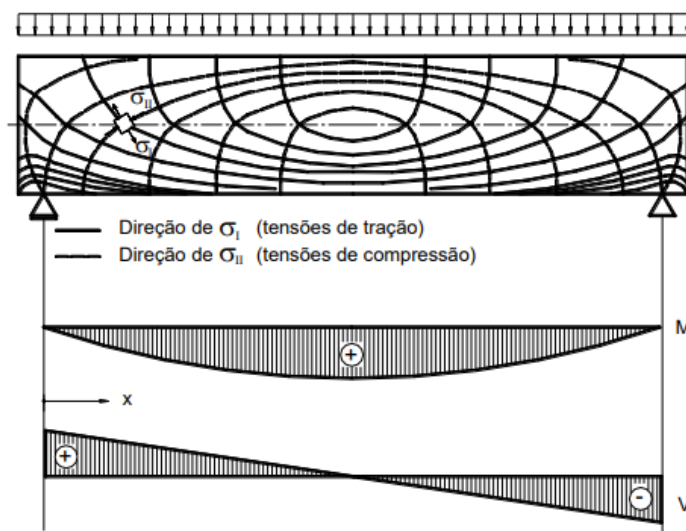
l – Medida dos dois trechos iguais.

4.5. Força cortante

Quando as tensões principais de tração superam a resistência do concreto à tração em determinado ponto, iniciam-se fissuras que, com o aumento dos esforços solicitantes, tendem a se propagar. Esse avanço progressivo reduz a capacidade do concreto em resistir à tração e pode, eventualmente, conduzir ao colapso da estrutura.

Em vigas submetidas a momentos fletores variáveis e esforços cortantes, desenvolvem-se tensões principais inclinadas tração (σ_I) e compressão (σ_{II}) entre os banzos, assim como ilustra a Figura 11, e com inclinações típicas próximas de 45° ou 135° , conforme apontam Leonhardt e Mönnig (1977).

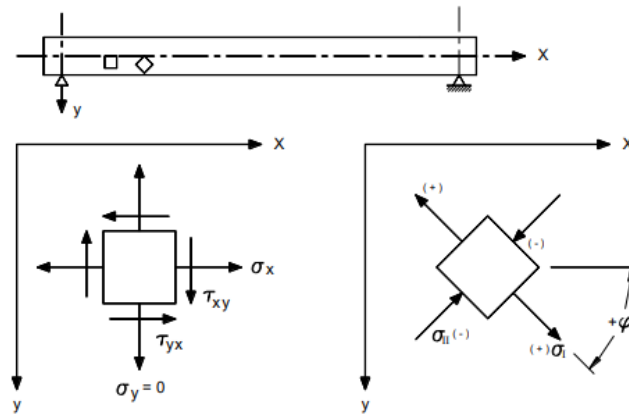
Figura 11 - Trajetórias tensões principais viga biapoiada



Fonte: Bastos, 2025.

Segundo Bastos (2025) além das tensões principais, outros estados podem ser representados, destaque para aquele segundo os eixos x-y, que define as tensões normais σ_x e σ_y e tensões de cisalhamento τ_{xy} e τ_{yx} , assim como indicado na Figura 12.

Figura 12 - Componentes de tensão nos eixos principais e em x e y

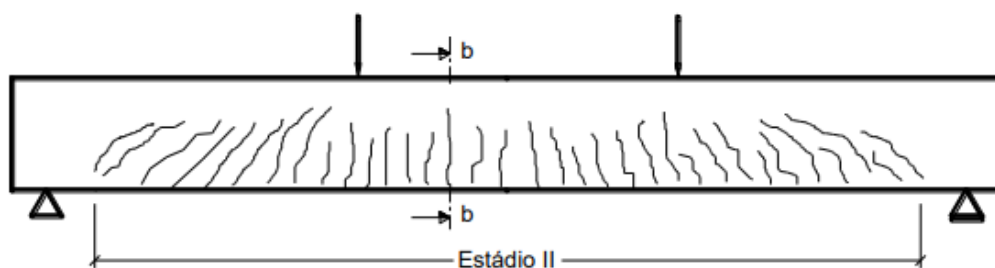


Fonte: Bastos, 2025.

De acordo com esses autores, as fissuras de cisalhamento em vigas com almas retangulares frequentemente se originam a partir de fissuras de flexão. Essas fissuras começam na fibra mais tracionada e se estendem até a linha neutra. Enquanto a solicitação de tração permanecer inferior à resistência do concreto, a peça encontra-se no Estádio I, caracterizado teoricamente pela ausência de fissuração. No entanto, ao se atingir a carga crítica, iniciam-se fissuras inclinadas orientadas segundo a trajetória das tensões principais de compressão — ou seja, perpendiculares a σ_I — marcando o início do Estádio II.

Em vigas biapoiadas com cargas concentradas, as fissuras de cisalhamento tendem a se formar com inclinação aproximada de 45° , propagando-se dos apoios em direção ao centro da viga, como descrito por Bastos (2023). Essas fissuras resultam da interação entre momentos fletores, esforços cortantes e forças axiais, como pode ser visto na Figura 13. Por esse motivo, o dimensionamento das estruturas de concreto armado contempla não apenas armaduras longitudinais para flexão, mas também armaduras transversais destinadas a resistir às solicitações de cisalhamento.

Figura 13 - Fissuração por flexão e força cortante



Fonte: Bastos, 2025.

As armaduras transversais, usualmente na forma de estribos, são dispostas verticalmente. Embora a posição inclinada a 45° fosse estruturalmente mais eficiente, questões práticas de execução tornam essa solução rara. Caso essas armaduras não sejam capazes de suportar os esforços atuantes, o aço pode atingir o escoamento e romper, ocasionando a falha da peça. Antes disso, fissuras inclinadas tendem a surgir próximas aos apoios, propagando-se em direção ao banzo comprimido.

Diversos fatores influenciam a ruptura por cisalhamento em vigas de concreto, como resistência do material, geometria da seção, dimensões, quantidade e distribuição das armaduras, vão livre e características do carregamento (BASTOS, 2023). Entre os modelos de cálculo existentes, o método da treliça — introduzido há mais de um século — permanece como referência principal nas normas internacionais e brasileiras. A NBR 6118:2023 adota dois modelos: o Modelo I, baseado na treliça clássica de Ritter-Mörsch, e o Modelo II, fundamentado na teoria da treliça generalizada.

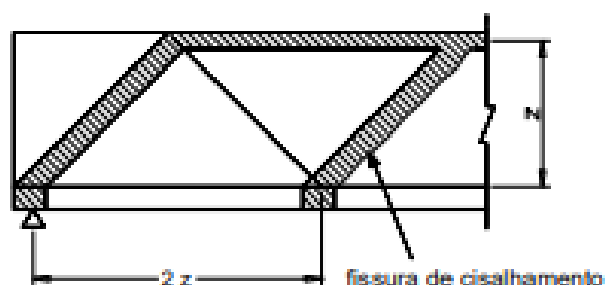
4.5.1. Treliça Clássica de Ritter-Morch ($\theta = 45^\circ$)

Modelo usado para determinar a armadura de cisalhamento necessária ao equilíbrio de uma viga de concreto armado, onde uma viga no Estádio II, no caso, fissurada, pode ser associada ao de uma treliça onde as armaduras e o concreto equilibrem conjuntamente a força cortante.

Conforme Bastos (2025), cada barra da treliça corresponde a um elemento de uma viga simples: o banzo inferior representa a armadura longitudinal de tração (A_s), enquanto o banzo superior corresponde ao concreto comprimido pela flexão. As diagonais inclinadas comprimidas funcionam como bielas de compressão formadas

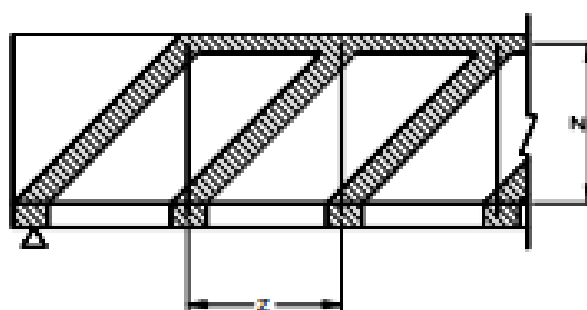
entre as fissuras de cisalhamento, ao passo que as diagonais tracionadas representam os estribos inclinados (Figura 14). Quando os estribos são verticais, eles passam a ser representados por montantes verticais na treliça (Figura 15). A treliça formada por banzos paralelos e diagonais comprimidas a 45° é denominada “treliça clássica”.

Figura 14 - Treliça para armadura transversal inclinada



Fonte: Bastos, 2025.

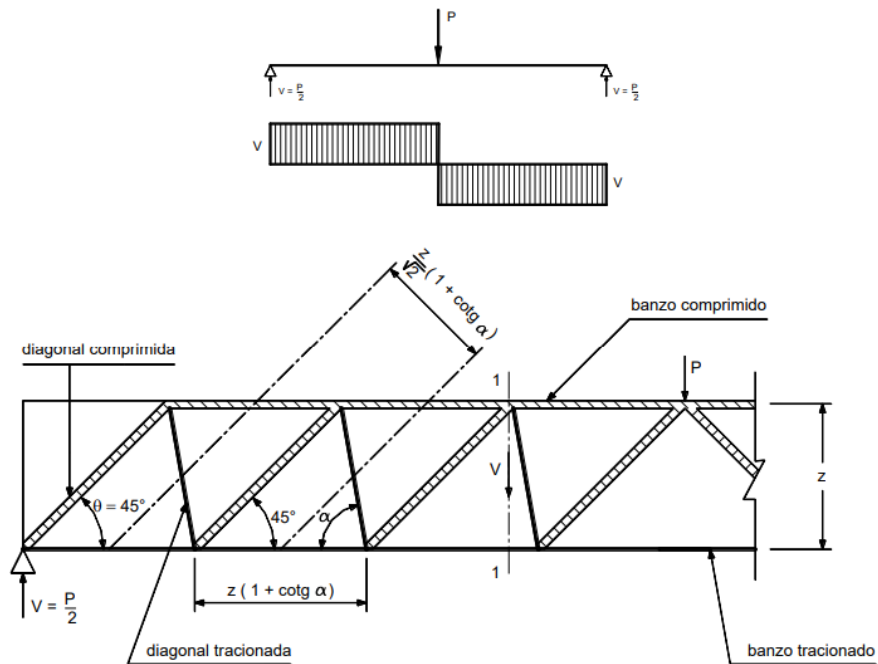
Figura 15 - Treliça para armadura transversal a 90°



Fonte: Bastos, 2025.

Na Figura 16, nota-se uma viga biapoiada no Estádio II, submetida a uma força concentrada P no meio do seu vão e que resulta força cortante, onde pode ser vista a treliça isostática.

Figura 16 - Viga segundo treliça de Ritter-Morch



Fonte: Bastos, 2025.

Bastos (2025) apresenta algumas relações para o cálculo do modelo de Ritter-Morch, conforme Tabela 3, em sequência.

Tabela 3 - Resumo equações para treliças clássicas em função do angulo a de inclinação das diagonais tracionadas

Força ou Tensão	Em função de α	$\alpha = 45^\circ$	$\alpha = 90^\circ$
Força na diagonal comprimida (R_{cb})	$\sqrt{2} V$	$\sqrt{2} V$	$\sqrt{2} V$
Tensão na diagonal comprimida (σ_{cb})	$\frac{V}{b_w z (1 + \cotg \alpha)}$	$\frac{V}{b_w z}$	$2 \frac{V}{b_w z}$
Força na armadura transversal (R_s)	$\frac{V}{\sen \alpha}$	$\frac{V}{\sen 45}$	V
Tensão na armadura transversal (σ_{sw})	$\frac{V}{z (\sen \alpha + \cos \alpha)} \frac{S}{A_{sw, \alpha}}$	$\frac{V}{z} \frac{s}{A_{sw, 45 \sqrt{2}}}$	$\frac{V}{z} \frac{s}{A_{sw, 90}}$

Fonte: Bastos, 2025.

4.5.2. Modelo de cálculo 1

A NBR 6118:2023 adota a treliça clássica de Ritter-Morch como modelo de cálculo I (item 17.4.2.2), ao admitir o ângulo θ de 45° entre as bielas de compressão e o eixo longitudinal do elemento estrutural, adotando, o valor da parcela V_c como constante, independente da força cortante solicitante V_{sd} .

a) Verificação da diagonal comprimida do concreto

Para a treliça clássica a tensão de compressão do concreto nas bielas pode ser definida através da Equação 10.

$$\sigma_{cb} = \frac{2 V}{b_w z (1 + \cot g \alpha)} \quad (10)$$

Segundo a NBR 6118:2023, o valor de f_{cd2} é o limite de tensão a compressão nas bielas, esse valor atua como um fator redutor da resistência à compressão do concreto, quando à tração transversal por efeito de armadura e existam fissuras transversais às tensões de compressão. Então, esse valor é definido pela Equação 11.

$$f_{cd} = 0,60 \left(1 - \frac{f_{cd}}{250} \right) f_{cd} = 0,60 \alpha_{vz} f_{cd} \quad (11)$$

$$\alpha_{v2} = \left(1 - \frac{f_{ck}}{250} \right) \quad (12)$$

Substituindo o braço de alavanca z por $0,9d$ (onde, d é a altura útil), σ_{cb} por f_{cd2} e V :

$$0,60 \alpha_{v2} f_{cd} = \frac{2 V_{Rd2}}{b_w 0,9d (1 + \cot g \alpha)} \quad (13)$$

$$V_{Rd2} = \frac{0,60 \alpha_{v2} f_{cd} b_w 0,9 d (1 + \cotg \alpha)}{2} \quad (14)$$

$$V_{Rd2} = 0,27 \alpha_{v2} f_{cd} b_w d (1 + \cotg \alpha) \quad (15)$$

A inclinação α do estribo deve estar compreendida entre 45° e 90° . Fazendo o α igual a 90° para estribo vertical tem-se a Equação 16.

$$V_{Rd2} = 0,27 \alpha_{v2} f_{cd} b_w d \quad (16)$$

Com $\alpha_{v2} = 1 - \frac{f_{ck}}{250}$, (f_{ck} em Mpa);

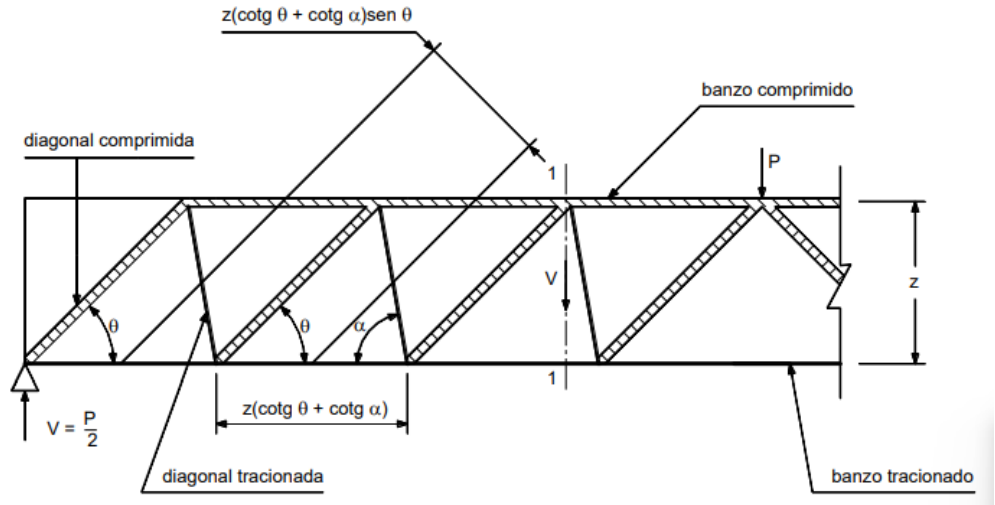
E, para que não ocorra o esmagamento das diagonais comprimidas deve-se aplicar:

$$V_{sd} \leq V_{Rd2}$$

4.5.3. Treliça Generalizada θ variável

Segundo Bastos (2025), com base em resultados de pesquisas notou-se que a inclinação das fissuras é geralmente inferior a 45° , podendo chegar a 30° ou até ângulos menores com o eixo longitudinal da viga, isso se dá devido a relação da quantidade de armadura transversal e da relação entre as larguras da alma b_w e da mesa comprimida b_f como por exemplo seções I e T. Já a treliça de Ritter-Morch não considera esses aspectos, tornando-se um método conservador, e conseqüentemente exagerando na armadura transversal. E, devido a isso com o propósito de levar em consideração a menor inclinação das fissuras surgiu a chamada “treliça generalizada”, Figura 17.

Figura 17 - Modelo treliça generalizada



Fonte: Bastos, 2025.

O modo de dedução das forças na treliça generalizada é semelhante à da treliça clássica, onde V a força cortante que atua na seção, a força na diagonal comprimida R_{cb} é determinada pelas Equações 17 e 18:

$$\text{sen} \theta = \frac{V}{R_{cb}} \quad (17)$$

$$R_{cb} = \frac{V}{\text{sen} \theta} \quad (18)$$

A distância entre duas diagonais comprimidas adjacentes, perpendicular a elas é determinada pela Equação 19.

$$z (\cotg \theta + \cotg \alpha) \text{sen} \theta \quad (19)$$

E, a tensão média de compressão na biela é dada por:

$$\sigma_{cb} = \frac{R_{cb}}{b_w z (\cotg \theta + \cotg \alpha) \text{sen} \theta} \quad (20)$$

$$\sigma_{cb} = \frac{V}{b_w z (\cotg \theta + \cotg \alpha) \text{sen}^2 \theta} \quad (21)$$

A força na diagonal comprimida pode ser considerada atuante na área da biela:

$$b_w z (\cotg\theta + \cotg\alpha) \text{sen}\theta \quad (22)$$

Onde: α é o ângulo de inclinação das diagonais tracionadas.

A partir do equilíbrio da seção da treliça, pode-se determinar a força na diagonal tracionada R_{sa} :

$$\text{sen}\alpha = \frac{V}{R_{sa}} \quad (23)$$

$$R_{sa} = \frac{V}{\text{sen}\alpha} \quad (24)$$

Cada diagonal tracionada, submetida à força $R_{s,\alpha}$, corresponde a um determinado comprimento da viga e deve ser resistida pelos estribos, que constituem a armadura transversal. Esses estribos são dispostos com espaçamento s e inclinados segundo um ângulo α . Assim, a área total de armadura necessária ao longo do comprimento $z \cdot (1 + \cotg\alpha)$, considerando A_{sw} como a área de aço de um estribo, é expressa pela Equação 25.

$$A_{sw,a} = \frac{z (\cotg\theta + \cotg\alpha)}{s} \quad (25)$$

Onde $z = (\cotg\theta + \cotg\alpha) / s$ representa o número de estribos nesse comprimento. A tensão σ_{sw} na armadura é calculada pelas Equações 26 e 27:

$$\sigma_{sw,a} = \frac{R_{s,a}}{\frac{A_{sw,a} z (\cotg\theta + \cotg\alpha)}{s}} \quad (26)$$

$$\sigma_{sw,a} = \frac{V}{z (\cotg\theta + \cotg\alpha) \text{sen}\alpha} \frac{s}{A_{sw,a}} \quad (27)$$

4.5.4. Modelo de cálculo II

A NBR 6118:2023 no Modelo II, admite diagonais de compressão inclinadas com θ entre 30° e 45° para força cortante, permitindo a parcela V_c sofrer redução com o aumento de V_{sd} .

- a) **Verificação da compressão diagonal do concreto, conforme Equação 28:**

$$V_{Rd2} = 0,54 \alpha_{v2} f_{cd} b_w d \sen^2 \theta (\cotg \alpha + \cotg \theta) \quad (28)$$

Com:

$$\alpha_{v2} = \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right) \quad (29)$$

f_{ck} em Mpa.

- b) **Cálculo da armadura transversal, Equação 30:**

$$V_{Rd3} = V_c + V_{sw} \quad (30)$$

Onde: (31)

$$V_{sw} = \left(\frac{A_{sw}}{s}\right) \cdot 0,90 f_{ywd} (\cotg \alpha + \cotg \theta) \sen \alpha$$

Sendo:

$V_c = 0$ em elementos estruturais tracionados com a linha neutra fora da seção;

$V_c = V_{c1}$ na flexão simples e na flexo-tração com a linha neutra cortando a seção;

$V_c = V_c = V_{c1} \left(1 + \frac{M_0}{M_{sd, \max}}\right) < 2V_{c1}$ na flexo-compressão;

$V_{c1} = V_{c0}$ quando $V_{sd} \leq V_{c0}$;

$V_{c1} = 0$ quando $V_{sd} = V_{Rd2}$.

- c) **Deslocamento do diagrama de momento fletores:** O deslocamento do diagrama de momentos fletores é empregado quando a armadura longitudinal

de tração é definida a partir do equilíbrio de esforços na seção normal ao eixo do elemento estrutural, conforme estabelecido na Equação 32.

$$a_l = 0,5d (\cot\theta + \cot\alpha) \quad (32)$$

Onde:

$a_l \geq 0,5d$ em geral;

$a_l \geq 0,2d$ para estribos com inclinação á 45°.

4.5.5. Tensão de cisalhamento da alma no estágio II

De acordo com Leonhardt e Mönning (1977), a tensão de cisalhamento na alma de uma viga fissurada é determinada pela Equação 33. O resultado obtido representa a tensão de cisalhamento atuante na linha neutra de uma seção transversal no Estádio II.

$$\tau_0 = \frac{Q}{b_0 \cdot z} \quad (33)$$

Onde:

τ_0 – tensão de cisalhamento na alma da viga fissurada;

b_0 – largura da alma, em lajes usa-se 100cm;

z – braço de alavanca.

4.6. Rupturas por força cortante

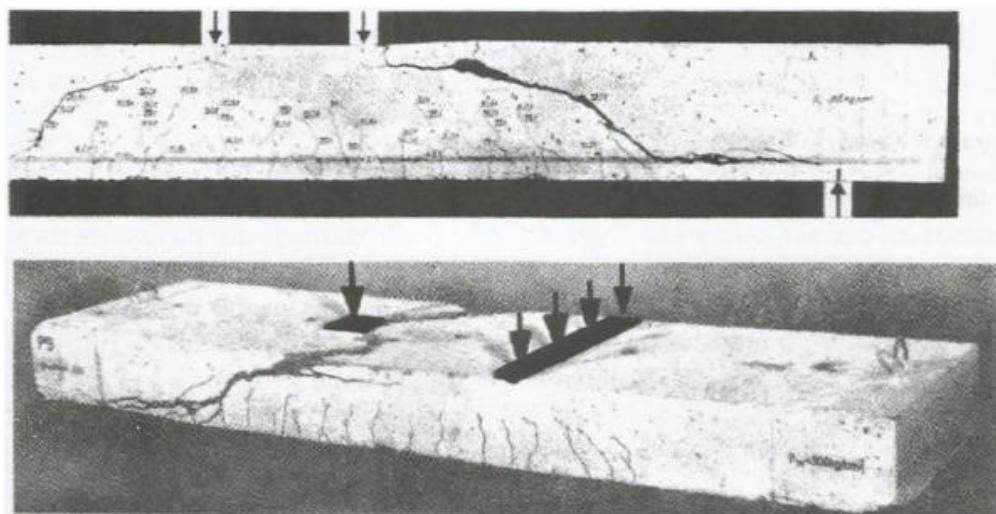
Conforme previamente discutido, quando a resistência à tração do concreto é superada pelas tensões principais de tração inclinadas, formam-se fissuras de cisalhamento orientadas perpendicularmente à σ_l . A presença dessas fissuras faz com que parte dos esforços atuantes na estrutura seja transferida para a armadura de tração. Dependendo da quantidade e da orientação dessa armadura, podem ocorrer diferentes modos de ruptura por esforço cortante (LEONHARDT e MÖNNIG, 1977).

4.6.1. Ruptura por cortante-flexão

Para Leonhardt e Mönning (1977), esse modo de ruptura ocorre devido ao surgimento de fissuras de cisalhamento que se desenvolvem a partir de fissuras de flexão na região submetida ao esforço cortante, resultantes do aumento das cargas atuantes na estrutura. Esse tipo de falha também pode ocorrer na ausência de armadura transversal ou quando ela é insuficiente, situação em que o aço atinge o escoamento e posteriormente se rompe.

Segundo os autores, “as fissuras de cisalhamento nas proximidades do apoio desenvolvem-se rapidamente, com direção quase plana e inclinada para cima, reduzindo a zona comprimida pela flexão, que então rompe de forma brusca”. Essa descrição é evidenciada na Figura 18, onde se observa que a diagonal comprimida separa a armadura longitudinal positiva, promovendo o processo de fissuração.

Figura 18 - Viga sem armadura de cisalhamento ruptura por cortante-flexão



Fonte: Leonhardt e Mönning, 1977.

4.6.2. Ruptura por cortante-tração

Conforme Leonhardt e Mönning (1977), esse tipo de ruptura pode ocorrer em duas situações:

- a) **Vigas com alma de largura usual:** nessa condição, surgem fissuras de cisalhamento a partir das fissuras iniciais de flexão. Quando a capacidade dos estribos é alcançada, essas fissuras se propagam e atingem a região do banzo comprimido, podendo levar ao colapso dos estribos ou da própria zona comprimida de flexão. Além disso, pode ocorrer a ruptura das diagonais comprimidas formadas entre as fissuras decorrentes do esforço cortante;
- b) **Vigas com almas delgadas:** típica de seções em “I” com alma estreita, nas quais as fissuras de cisalhamento surgem diretamente na alma devido aos elevados esforços cortantes. Nesse caso, a fissura se propaga em direção à parte inferior da viga, resultando no colapso da peça.

4.6.3. Ruptura das diagonais de compressão

Conforme Leonhardt e Mönning (1977), em seções do tipo “I” com banzos reforçados, elevada armadura na alma e almas delgadas, formam-se numerosas fissuras de cisalhamento com inclinação próxima de 45°. Entre essas fissuras, permanecem as diagonais de compressão do concreto, que podem romper ao atingirem a resistência máxima do material, levando a peça ao colapso antes mesmo da ruptura da armadura.

4.6.4. Ruptura por falha de ancoragem

Em situações em que a armadura longitudinal é intensamente solicitada até a região de apoio devido ao efeito de arco, lajes ou vigas em “I” ou “T” com almas espessas podem apresentar ruptura por falha de ancoragem quando essa armadura não estiver adequadamente ancorada. Nesses casos, ocorre o colapso da estrutura por fendilhamento do concreto, caracterizado por uma ruptura brusca decorrente do deslizamento da armadura longitudinal, o que provoca o cisalhamento da alma. Ressalta-se, porém, que esse modo de falha não é causado exclusivamente pelo esforço cortante (LEONHARDT e MÖNNIG, 1977).

4.7. Força cortante em lajes pré-moldadas

Conforme Carvaho e Figueiredo Filho (2014), o cisalhamento em lajes pré-moldadas pode ser verificado como vigas, pois as lajes nada mais são do que vigas contínuas. Na laje pré-moldada costuma-se desconsiderar as diagonais laterais dela, apesar ajudarem a melhorar a resistência.

A NBR 6118:2023 apresenta a verificação da força cortante em lajes com $b_w \geq 5d$ em situações de lajes com e sem armadura transversal.

4.7.1. Lajes sem armadura transversal

De acordo com o item 19.4.1 da NBR 6118:2023, em lajes cuja largura da nervura (b_w) seja maior ou igual a $5d$, é permitido dispensar a armadura transversal destinada a resistir às tensões de tração provocadas pelo esforço cortante. Para que essa dispensa seja válida, o esforço cortante de cálculo V_{sd} , considerado a uma distância d da face do apoio, deve ser menor ou igual à resistência de projeto ao cisalhamento V_{Rd1} , conforme apresentado na Equação 34.

$$V_{sd} \leq V_{Rd1} = [\tau_{Rd} \cdot k \cdot (1,2 + 40 \cdot \rho_1) + 0,15 \cdot \sigma_{cp}] \cdot b_w \cdot d \quad (34)$$

Caso não haja força normal ou protensão ocasionando compressão, a expressão pode ser reescrita conforme Equação 35.

$$V_{sd} \leq V_{Rd1} = [\tau_{Rd} \cdot k \cdot (1,2 + 40 \cdot \rho_1)] \cdot b_w \cdot d \quad (35)$$

Onde a mesma pode ser resolvida considerando os seus coeficientes conforme as Equações 36 a 38.

$$\pi_{Rd} = 0,25 \cdot f_{cd} = 0,25 \cdot \frac{f_{ctk,inf}}{\gamma_c} \quad (36)$$

$$\rho_1 = \frac{A_{s1}}{b_w \cdot d} \leq 0,02 \quad (37)$$

$$\sigma_{cp} = \frac{N_{sd}}{A_c} \quad (38)$$

Onde:

A_{s1} – em lajes com vigotas pré-moldadas, é a armadura longitudinal total de nervuras no trecho considerado;

d – altura útil; b_w – largura mínima da seção ao longo de d (100 cm em lajes);

τR_d – tensão resistente de cisalhamento;

N_{sd} – força longitudinal na seção devido à protensão ou carregamento;

k – coeficiente que tem como valores:

$k = |1|$ para elementos onde 50% da armadura inferior não chega ao apoio;

$k = |1,6 - d|$, não menor que 1, para os demais casos, com d em metros.

Bastos (2025), menciona que o comprimento de ancoragem deve possuir armaduras nos apoios, calculadas através da Equação 39:

$$l_{b,nec} = \alpha \cdot l_b \cdot \frac{A_{s,calc}}{A_{s,ef}} \geq l_{b,min} \quad (39)$$

Onde:

α – 1,0 para barras sem gancho; 0,7 para barras tracionadas com gancho, com cobrimento no plano normal ao do gancho $\geq 3\phi$; 0,7 quando houver barras transversais soldadas conforme NBR 6118:2023 (item 9.4.2.2); 0,5 quando houver barras transversais soldadas conforme o mesmo item da norma e gancho com cobrimento normal no plano normal ao do gancho $\geq 3\phi$;

l_b – comprimento de ancoragem básico;

$A_{s,calc}$ – área de armadura calculada;

$A_{s,ef}$ – área de armadura efetiva;

$l_{b,min}$ – calculado pela equação 40:

$$l_{b,min} \geq \begin{cases} 0,3l_b \\ 10\phi \\ 100mm \end{cases} \quad (40)$$

4.7.2. Lajes com armadura transversal

A laje também pode ser dimensionada com armadura transversal específica para resistir aos esforços de cisalhamento. Para isso, devem ser observados os critérios estabelecidos no item 17.4.2 da NBR 6118:2023, aplicáveis ao dimensionamento de vigas submetidas à força cortante. Esse item estabelece que a resistência oferecida pelos estribos deve atender às seguintes condições:

- Para lajes até 15 cm de espessura: 250 MPa;
- Para lajes com espessura maior que 35 cm: 435 MPa (f_{ywd}).

4.8. Cisalhamento conforme EF-96 em lajes nervuradas pré-moldadas

No que se refere à verificação do cisalhamento em lajes, a EF-96 (1997), assim como a NBR 6118:2023, estabelece requisitos específicos que devem ser atendidos.

Quando o esforço cortante de cálculo é menor ou igual ao valor da força cortante última resistente das nervuras, a norma permite a execução de lajes nervuradas pré-moldadas sem a necessidade de armadura transversal. Caso essa condição não seja satisfeita, pode-se optar por aumentar as dimensões das nervuras ou, embora seja uma solução pouco comum, incluir armadura transversal na laje.

Dessa forma, a EF-96 (1997) apresenta os seguintes critérios para a verificação dos esforços de cisalhamento:

a) Ruptura por compressão oblíqua da nervura, Equação 41:

$$V_{sd} \leq V_{U1} = 0,3 \cdot f_{cd} \cdot b_w \cdot d \quad (41)$$

b) Ruptura por tração oblíqua da nervura, Equação 42 e 43:

- Sem armadura transversal

$$V_{sd} \leq V_{u2} = \xi \cdot \zeta \cdot f_{cv} \cdot b_w \cdot d \quad (42)$$

- Com armadura transversal

$$V_{sd} \leq V_{U3} = \{[f_{cv} \cdot b_w \cdot d] + [0,9 \cdot f_{td} \cdot A_t \cdot (\sin \alpha + \cos \alpha) \cdot d]\} \quad (43)$$

Onde:

b_w – largura da nervura;

d – altura útil da laje;

f_{cd} – resistência de cálculo à compressão do concreto;

f_{cv} – resistência nominal de cálculo do concreto ao esforço cortante, sendo $0,16 \cdot \sqrt{f_{cd}}$; ξ – fator adimensional, calculado por $\xi = (1,6 - d) \leq 1$;

ζ – fator adimensional, calculado por $\zeta = (1 + 50 \cdot \rho) \geq 2$; $\rho = A_s / (b_w \cdot d)$; f_{yk} 410 ; 70 A_s – área da armadura de tração;

f_{td} – resistência de cálculo à tração da armadura transversal; A_t – área da armadura transversal.

5. METODOLOGIA

Nesse capítulo mostra-se o processo da elaboração dos protótipos para os ensaios experimentais a ruptura por força cortante, passo a passo, desde a definição, elaboração e confecção, até os modos de ruptura de cada laje ensaiada.

As análises experimentais foram realizadas através de ensaios laboratoriais em lajes pré-moldadas em painéis treliçados, onde constituiu-se seis protótipos de lajes pré-moldadas utilizando painéis treliçados e bloco de EPS como elemento de preenchimento, onde três dos protótipos foram adicionados malha, denominados LM1, LM2 e LM3 e os outros três somente a vigota e a armadura adicional, denominados L1, L2 e L3.

Este capítulo também apresenta as estimativas do esforço cortante de ruptura para cada um dos modelos de lajes ensaiados, bem como os respectivos valores de resistência ao cisalhamento de cálculo. Para o desenvolvimento dessas análises teóricas, foram adotados os parâmetros reais dos materiais, detalhados nos tópicos subsequentes, considerando-se a média dos resultados dos corpos de prova (CP's).

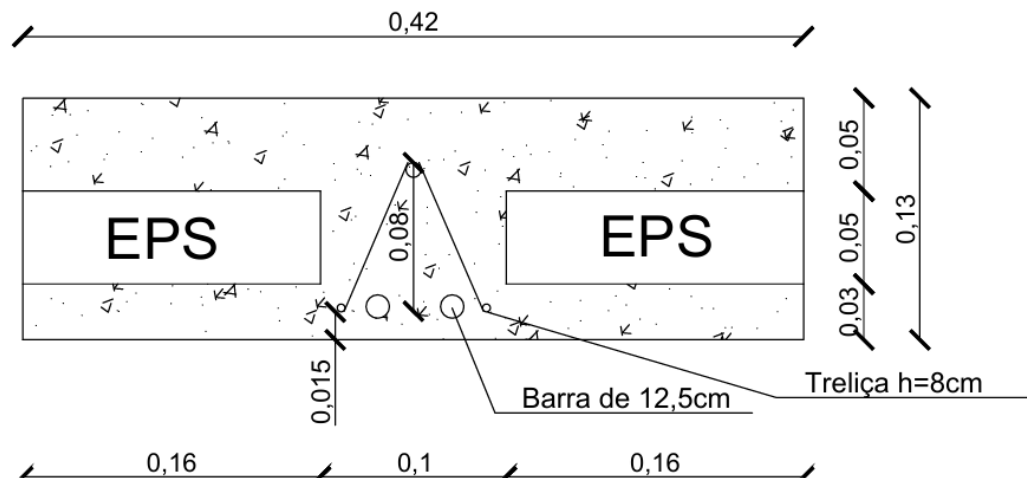
5.1. Definição dos protótipos

Para a realização dos protótipos foi definido as dimensões das lajes em 42cm x 50cm, sendo a largura de 42cm devido a nervura, e a altura ficou definida em 13cm para a laje sem o reforço da malha, denominadas como L1, L2 e L3, e 14cm na laje com reforço da malha, denominadas LM1, LM2 e LM3. Foi considerado para a parte do material inerte, no caso o EPS com 32cm, sendo 16cm utilizados em cada lado da nervura.

A altura total da laje sem a malha ficou em 13cm, e a com a malha em 14cm sendo 10cm de nervura, definido por conta das dimensões do EPS utilizado, e com a capa de 5cm de concreto, as Figuras 19 e 20 demonstram o esquema de seções transversais de forma e das lajes treliçadas sem malha e com malha.

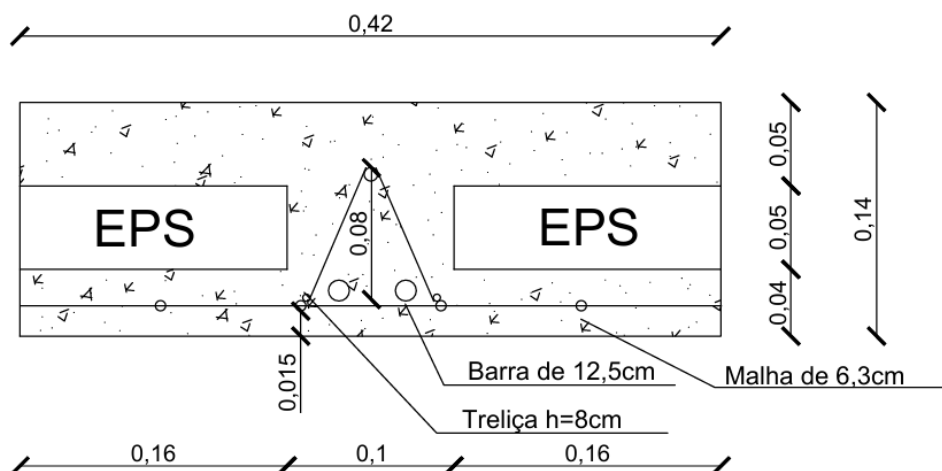
As vigotas e os painéis treliçados usados no estudo foram fabricadas pela autora no laboratório do curso de engenharia civil da Universidade de Santa Cruz do Sul – UNISC.

Figura 19 - Esquema Longitudinal Laje Sem Malha



Fonte: Autora, 2026

Figura 20 - Esquema Longitudinal Laje Com Malha



Fonte: Autora, 2026

5.2. Confeção dos protótipos

Para confecção das lajes teve-se o cuidado na seleção dos materiais e controle das quantidades utilizadas, garantindo uniformidade e confiabilidade nos resultados obtidos durante os ensaios experimentais. Os protótipos foram executados de maneira a reproduzir as características das lajes pré-moldadas analisadas neste estudo.

5.3. Materiais

5.3.1. Concreto da mesa, nervura e capa

Foi utilizado concreto de alta resistência inicial, tendo como traço 1,0 : 2,50 : 3,5 : 0,6, que corresponde a CP V ARI, areia média, brita 1 e água potável. O cimento CPV ARI caracteriza-se pelo alto ganho de resistência mecânica nas primeiras idades, utilizado em situações que exigem redução do tempo de cura e desforma rápida de peças estruturais.

No presente trabalho, a utilização do CP V ARI foi adotada com o objetivo de garantir a resistência necessária para os protótipos em um menor espaço de tempo.

5.3.2. Aço da nervura e malha

A treliça adotada para a confecção dos protótipos foi a TB 8L, constituída por armadura eletrossoldada CA-60, com altura de 8cm, banzo superior com 6mm de diâmetro e banzos inferiores com 4,2mm de diâmetro. Como armadura adicional a treliça foi utilizada duas barras de aço CA-50 com 12,5mm de diâmetro.

Na realização dos protótipos com a malha adicional, além da treliça TB 8L, as barras de 12,5mm, foi empregada uma malha de aço CA-50 diâmetro de 6,3mm, disponível no laboratório, com objetivo de complementar a armadura da capa de concreto dos modelos ensaiados.

Figura 21 - Amarração das treliças com barra adicional de 12,5mm



Fonte: Autora, 2026.

Figura 22 - Posicionamento Trelças



Fonte: Autora, 2026.

5.3.3. Execução dos protótipos

Para a execução dos protótipos de lajes foram realizados os seguintes passos:

- a) Formas: as formas foram confeccionadas nas medidas de 42x50cm, conforme Figura 23, de madeira forradas com lona para facilitar o desforme das lajes.

Figura 23 - Forma das lajes



Fonte: Autora, 2026.

- b) Concretagem da mesa e posicionamento da armadura da nervura: foi realizado a primeira concretagem, a da mesa, nas lajes com a treliça e a armadura adicional ela ficou com 3cm de espessura e nas lajes que tinham a malha e a treliça com a armadura adicional, ficou com 4cm de espessura. E, assim foi posicionada as treliças cuidando o meio da nervura.
- c) Preparação do concreto: O concreto foi realizado seguindo o traço 2,5: 3: 1,5 a/c= 0,6. Para a concretagem da mesa foi realizado três betonadas, e para a concretagem da capa apenas uma betonada foi necessária. Quando a mistura estava homogênea, foi feito o slump test, para verificar se estava adequado para uso a partir da consistência do concreto. Conforme o traço os testes que foram realizados apresentaram resultado de 85mm de abatimento.
- d) Lançamento do concreto: após o preparo do concreto, realizou-se o seu lançamento na forma, sendo posteriormente efetuado o adensamento com o auxílio de vibrador de concreto, de modo a evitar a formação de vazios que poderiam comprometer os resultados do ensaio. Esse procedimento foi realizado tanto na concretagem da mesa, quanto na concretagem da nervura e capa. Por fim, executou-se o nivelamento da capa.

Figura 24 - Protótipos finalizados



Fonte: Autora, 2026.

- e) Cura: após a finalização de todo o processo de concretagem, realizou-se a cura das lajes por meio de hidratação diária, com objetivo de evitar a perda de água do concreto, essencial para as reações de hidratação e cristalização de seus componentes, responsáveis pelo desenvolvimento da resistência mecânica. Esse procedimento foi mantido até o sétimo dia em cada etapa, tanto na primeira concretagem, quanto na última.

5.4. Ensaaios

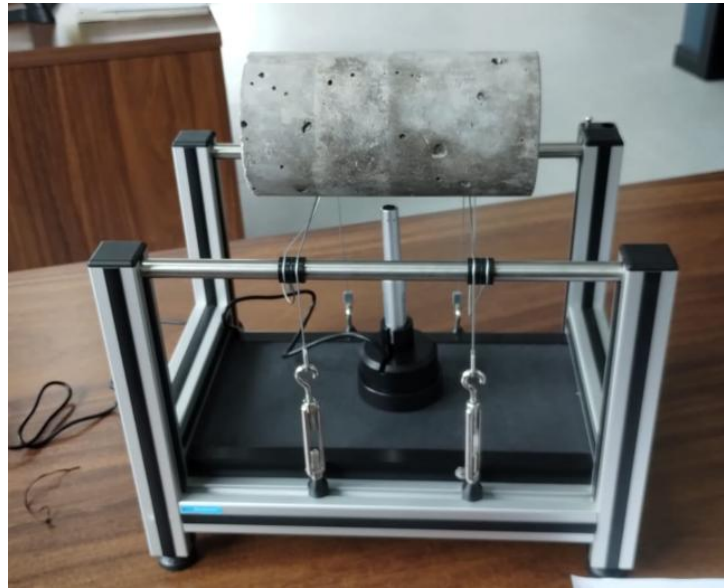
5.4.1. Ensaio do módulo de elasticidade dinâmico do concreto

Para a determinação do módulo de elasticidade dinâmico do concreto, foi realizado o ensaio pelo sistema Sonelastic HZ, que determina o módulo através de ondas ultrassônicas empregando a técnica de excitação por impulso, conforme Figura 26.

Primeiramente é determinado as dimensões e a massa dos corpos de prova, com as medições realizadas é marcado as linhas nodais, localizadas na posição 0,224.h. Posteriormente as medições e marcação das linhas nodais, o corpo de prova é posicionado cuidadosamente apoiado no equipamento, cuidando para o posicionamento estar alinhado as linhas nodais marcadas, o impacto é aplicado no centro por meio do pulsador.

Os resultados são obtidos através da resposta vibratória gerada que é capturada pelo sistema, os dados são processados pelo software, que calcula automaticamente o módulo dinâmico do material e estima o estático, conforme Tabela 4 e 5.

Figura 25 - Aparelho de ensaio módulo de elasticidade



Fonte: Autora, 2026.

Tabela 4 - Módulo de elasticidade estático e dinâmico mesa

Corpo de prova	B1 - CP1	B1 - CP2	B1 - CP3	B1 - CP4	B2 - CP1	B2 - CP2	B2 - CP3	B2 - CP4	B3 - CP1	B3 - CP2	B3 - CP3	B3 - CP4	Média (Gpa)	Desv. Padrão
Módulo de elasticidade estático (Gpa)	30,22	28,23	29,45	28,30	33,40	34,14	32,06	31,66	30,96	28,37	29,24	29,97	30,75	2,04
Módulo de elasticidade dinâmico (Gpa)	39,50	37,86	39,50	34,63	43,40	44,13	42,49	42,29	41,02	38,88	40,11	40,46	40,36	2,61
Compressão simples (Mpa)	26,89	24,82	27,25	27,72	31,37	32,59	31,75	31,36	26,79	26,97	26,38	26,08	28,33	2,65

Fonte: Autora, 2026.

Tabela 5 - Módulo de elasticidade estático e dinâmico capa

Corpo de prova	BT2 - CP1	BT2 - CP2	BT2 - CP3	BT2 - CP4	Média (Gpa)	Desv. Padrão
Módulo de elasticidade estático (Gpa)	30,22	28,23	29,45	28,30	29,05	0,83
Módulo de elasticidade dinâmico (Gpa)	39,50	37,86	39,50	34,63	37,87	1,99
Compressão simples (Mpa)	29,74	30,15	30,65	28,79	29,83	0,68

Fonte: Autora, 2026.

5.4.2. Ensaio de compressão nos corpos de prova de concreto

Foram moldados e ensaiados à compressão os corpos de prova de concreto, para o controle do concreto utilizado a fim de determinar a resistência a compressão do concreto (f_{ck}) utilizado na confecção dos protótipos das lajes. Foram executados ao todo dezesseis corpos de prova, devido a concretagem da mesa ter sido necessária três betoneiras, e a concretagem da capa somente uma, foram executados quatro corpos de prova de cada betoneira. Os ensaios seguiram as diretrizes estabelecidas pela NBR 5739:2018.

A sequência do ensaio realizado foi:

- a) Preparação dos moldes dos corpos de prova: Aplicou-se em toda área interna dos moldes dos corpos de prova, uma camada de desmoldante para concreto revestido, para facilitar o desmolde.
- b) Moldagem dos corpos de prova: Após finalização da preparação dos concretos, ele foi depositado nos moldes em duas camadas, sendo aplicado doze golpes em cada, com o uso de uma haste, a fim de garantir o adensamento adequado dos corpos de prova. Os mesmos, após serem moldados, foram identificados e armazenados em local coberto.
- c) Desmoldagem: Conforme recomendação do orientador Christian Donin, os corpos de prova foram desmoldados após 36 horas de cura inicial, e alocados no tanque de cura, a fim de proporcionar cura adequada aos mesmos.
- d) Retificação dos CP's: Após esperar o tempo de cura dos corpos de prova em média de 15 dias, eles foram removidos do tanque para a realização da regularização das faces por meio da retificação, onde uma camada fina é retirada por meio mecânicos, a fim de deixar as bases planas e assim distribuir as forças igualmente na realização do ensaio de compressão. Foram retificados os dois lados dos CP's.
- e) Ensaio de compressão: Com os CP's preparados, posicionados um a um no equipamento de ensaio aplicando-se uma força de compressão até o seu rompimento, conforme a Figura 29. No final dos ensaios, os resultados

alcançados foram gerados pelo equipamento através de relatórios de cada peça ensaiada, conforme é demonstrado no gráfico abaixo.

Figura 26 - Corpo de prova rompido por compressão



Fonte: Autora, 2026.

Tabela 6 - Resultado ensaio de compressão CP's mesa

Corpo de Prova	Resistencia à compressão (MPa)	Média (fc)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de variação (%)
B1 - CP1	26,89	28,33	2,65	9,36%
B1 - CP2	24,82			
B1 - CP3	27,25			
B1 - CP4	27,72			
B2 - CP1	31,37			
B2 - CP2	32,59			
B2 - CP3	31,75			
B2 - CP4	31,36			
B3 - CP1	26,79			
B3 - CP2	26,97			
B3 - CP3	26,38			
B3 - CP4	26,08			

Fonte: Autora, 2026.

Tabela 7 - Resultado ensaio de compressão CP's capa

Corpo de Prova	Resistencia à compressão (MPa)	Média (fc)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de variação (%)
BT2 - CP1	29,74	29,83	0,79	2,64%
BT2 - CP2	30,15			
BT2 - CP3	30,65			
BT2 - CP4	28,79			

Fonte: Autora, 2026.

Através destes resultados dispostos nas Tabelas 6 e 7, foi possível determinar a resistência real do concreto à compressão utilizado nos protótipos, conforme o número de CP's realizados, foi utilizado como resistência a compressão a média dos resultados.

5.4.3. Ensaio de tração em barras de aço

O ensaio de tração em barras de aço é um método utilizado para avaliar as propriedades mecânica do aço. O procedimento consiste na aplicação gradual de uma força de tração axial sobre o corpo de prova até a sua ruptura, conforme Figura 30. Por, meio deste ensaio, foram obtidos parâmetros importantes, como limite de escoamento e resistência à tração. Foram ensaiados à tração três protótipos de cada aço presente nas nervuras das lajes, sendo eles:

- a) Três protótipos do aço CA-60 de diâmetro 4,2mm dos banzos inferiores da treliça;
- b) Três protótipos da barra de CA-50 de diâmetro 12,5mm, utilizada em todas as lajes para resistência a flexão;
- c) Três protótipos das barras da malha que foi utilizada em três protótipos das lajes, sendo de aço CA-60 e diâmetro de 6,3mm.

Os resultados e médias das resistências obtidos são demonstrados nas Tabelas 8, 9 e 10, onde foram adotadas as médias como resultado para o concreto das lajes.

Figura 27 - Ensaio de tração nas barras



Fonte: Autora, 2026.

Tabela 8 - Resultado ensaio tração barra de 12,5mm

Corpo de Prova	Tensão de Escoamento (MPa)	Média (fy)	Desvio Padrão	Coeficiente de variação (%)
CP1	570,21	552,39	29,90	5,41%
CP2	569,1			
CP3	517,87			

Fonte: Autora, 2026.

Tabela 9 - Resultado ensaio tração barra de aço da treliça 4,2mm

Corpo de Prova	Tensão de Escoamento (MPa)	Média (fy)	Desvio Padrão	Coeficiente de variação (%)
CP1	761,05	755,06	6,71	0,89%
CP2	756,32			
CP3	747,81			

Fonte: Autora, 2026.

Tabela 10 - Resultado ensaio de tração barra de aço malha 6,3mm

Corpo de Prova	Tensão de Escoamento (MPa)	Média (fy)	Desvio Padrão	Coeficiente de variação (%)
CP1	681,48	678,21	4,79	0,71%
CP2	680,44			
CP3	672,71			

Fonte: Autora. 2026.

5.5. Análise experimental

5.5.1. Procedimento de ensaio dos protótipos

Os ensaios experimentais dos protótipos das lajes foram realizados no equipamento EMIC/Instron Brasil modelo GR048, uma máquina universal de ensaio utilizada para ensaios mecânicos de compressão, flexão, tração e cisalhamento. O equipamento possui capacidade de até 300kN e utiliza sistema auto travante com pré aperto pneumático, conforme Figura 31.

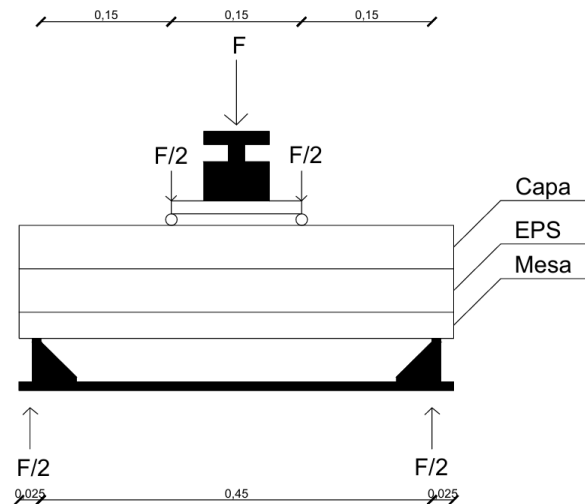
Figura 28 - Aparelho de ensaio dos protótipos



Fonte: Autora, 2026.

Os protótipos das lajes foram posicionados sobre dois apoios metálicos, onde foi cuidado a sua posição a 2,5cm de cada extremidade da nervura, assim, gerando um vão de 45cm. A carga foi aplicada em dois pontos, à um terço de cada extremidade do vão do ensaio, conforme ilustrado na Figura 32.

Figura 29 - Esquema de ensaio para análise da resistência



Fonte: Autora, 2026.

5.5.2. Preparação dos protótipos para realização do ensaio

Para realização dos ensaios, os apoios metálicos foram inicialmente instalados no equipamento de ensaio Intron EMIC GR048, de forma a proporcionar um vão de 45cm, previamente definido para o procedimento experimental. Em seguida, as lajes foram posicionadas sobre os apoios.

Posteriormente, foram instaladas duas barras cilíndricas responsáveis por receber metade do carregamento aplicado pela célula de carga, conforme o esquema de ensaio apresentado na Figura 33. O sistema foi configurado para transmitir o carregamento em dois pontos situados a um terço de cada extremidade do vão de ensaio.

Após o correto posicionamento da laje e dos dispositivos de carregamento, iniciou-se a aplicação gradual da carga até a ocorrência da ruptura dos elementos ensaiados.

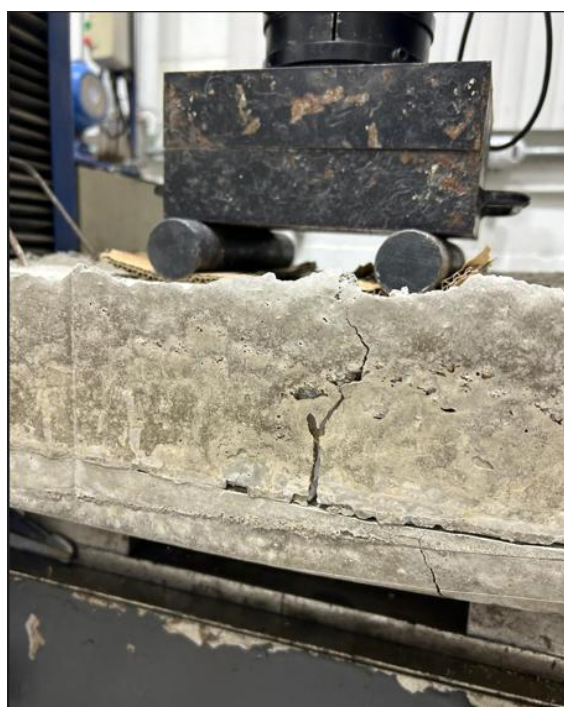
Figura 30 - Preparação do ensaio



Fonte: Autora, 2026.

A caracterização de ruptura por cisalhamento é a ruptura a aproximadamente 45° em direção ao apoio, abaixo na Figura 34 é possível visualizar essa ruptura.

Figura 31 - Protótipo rompido



Fonte: Autora, 2026

5.6. Análise Experimental

Posteriormente a definição dos protótipos das lajes, foram concretados seis protótipos, sendo três com nervuras treliçadas e com armadura adicional de duas barras de 12,5mm diâmetro, e os outros três além da treliça e da armadura adicional foi adicionado mais uma malha de 6,3mm de diâmetro.

As barras adicionais de 12,5mm foram utilizadas com a finalidade de resistirem a tração, possibilitando que os protótipos rompessem à cisalhamento a fim de possibilitar as análises teóricas e experimentais do estudo.

5.7. Análise teórica

A fim de analisar a força cortante resistente de cálculo dos protótipos das lajes, seguiu-se o modelo de cálculo da NBR 6118:2023, além de analisar, desenvolver e aplicar outros padrões de cálculos que chegam mais próximos ao resultado encontrado experimentalmente. Os parâmetros utilizados para a comparação entre os modelos teóricos e os ensaios práticos foram as dimensões das lajes ensaiadas.

Considerando que já se possuía o valor da resistência ao cisalhamento dos protótipos, para a obtenção do resultado dos cálculos, calculou-se considerando o valor de minoração da resistência $\gamma_c = 1,0$, de modo a obter à força cortante estimada de ruptura (V_r , est, rup). Além de considerar-se no cálculo uma área de influência maior para a obtenção mais próxima a força de ruptura encontrada no ensaio experimental, para isso, foram feitas várias análises de cálculos.

A seguir, apresentam-se as etapas de cálculo, de modo a verificá-las com os resultados obtidos na análise experimental.

5.7.1. Forças cortantes estimadas de ruptura

Para calcular à força cortante estimada de ruptura, primeiramente calcula-se o valor de d , distância da superfície da laje ao centro da armadura inferior presente na nervura, como pode ser visto nas Figuras 19 e 20.

Para a laje sem a malha adicional:

$$d = 13\text{cm} - 1,5\text{cm} - \left(\frac{1,25}{2}\right)\text{cm} = 10,875\text{cm}$$

Segundo a NBR 6118:2023, para o cálculo da força cortante estimada de ruptura V_{rd1} , com o fator de minoração de resistência $\gamma_c = 1,0$, considerando apenas o concreto usa-se a fórmula:

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

Onde:

$f_c = 29,83\text{MPa}$ valor da média obtida pelo ensaio de compressão.

$$f_{ct} = 0,3 \cdot \frac{f_c^{\frac{2}{3}}}{\gamma_c} = 0,3 \cdot \frac{(29,83\text{MPa})^{\frac{2}{3}}}{1,0} = 2,88\text{MPa} = \frac{0,288\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

$$\tau_{rd} = 0,25 \cdot f_{ct} = 0,25 \cdot 0,288\text{kN/cm}^2 = 0,072\text{kN/cm}^2$$

$$k = 1,6 - d = 1,6 - 0,10875 = 1,49125$$

$$\rho_1 = \frac{A_{s1}}{b_w \cdot d} = \frac{(2,0,139\text{cm}^2) + (2,1,227\text{cm}^2)}{10\text{cm} \cdot 10,875\text{cm}} = 0,025 < 0,02$$

Usa-se para $\rho_1 = 0,02$

$$V_{rd1} = [0,072\text{kN/cm}^2 \cdot 1,49125 \cdot (1,2 + 40 \cdot 0,02)] \cdot 10 \cdot 10,875$$

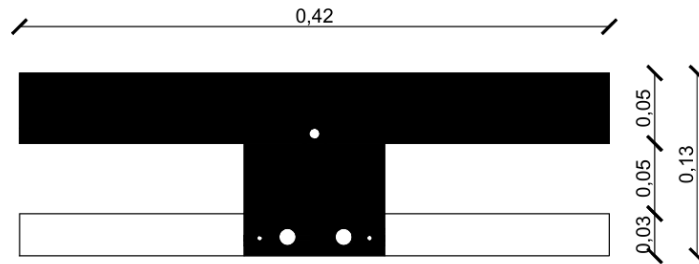
$$V_{rd1} = 23,35\text{ kN}$$

Considerando a carga última média obtida experimentalmente para os protótipos de lajes treliçadas com armadura adicional, igual a 29,05 kN, verificou-se que os modelos apresentaram uma resistência 24,35% superior à força cortante estimada pelos cálculos teóricos. Esse resultado evidencia que o método inicialmente adotado para a estimativa da resistência ao cisalhamento não representou com elevada precisão o comportamento observado experimentalmente. Em razão dessa discrepância, foram realizadas análises complementares utilizando diferentes metodologias de cálculo, com o objetivo de identificar o procedimento que melhor se aproxima dos resultados obtidos nos ensaios. Ao todo, foram avaliados três métodos para os protótipos sem a malha adicional e quatro métodos para o protótipo com a malha adicional, ambos métodos distintos de cálculo para a estimativa da resistência ao cisalhamento.

1º Método, considerando a área total da capa mais a nervura:

Neste método utilizado para realização do cálculo, considera-se a área total de concreto da mesa e da nervura, conforme Figura 35.

Figura 32 - Método de cálculo 1 protótipo sem a malha



Fonte: Autora, 2026.

$$Vrd1 = [\tau_{rd}.k. (1,2 + 40.\rho_1)]. Ac$$

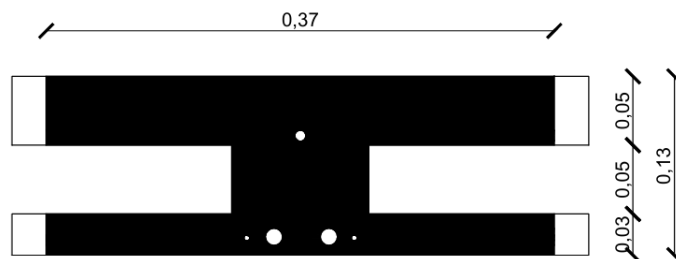
$$Ac = (42cm \times 5cm) + (8cm \times 10cm) = 290cm^2$$

$$Vrd1 = [0,072kn/cm^2. 1,49125 . (1,2 + 40.0,02)]. 290$$

$$Vrd1 = 62,27 kN$$

2º Método, considerando a área da capa e da mesa, Figura 36:

Figura 33 - Método de cálculo 2 protótipo sem a malha



Fonte: Autora, 2026.

$$Vrd1 = [\tau_{rd}.k. (1,2 + 40.\rho_1)]. Ac$$

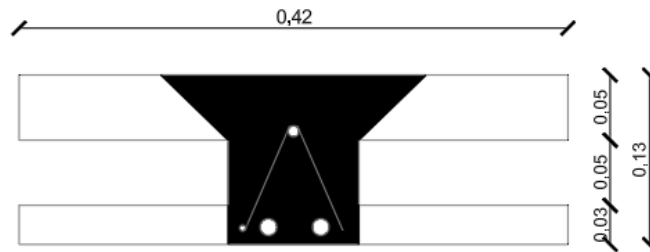
$$Ac = (37cm \times 5cm) + (10cm \times 5cm) + (37cm \times 3cm) = 346cm^2$$

$$Vrd1 = [0,072kn/cm^2. 1,49125 . (1,2 + 40.0,02)]. 346cm^2$$

$$Vrd1 = 74,30 kN$$

3º Método, considerando um ângulo de 45° na capa e a área da nervura, Figura 37:

Figura 34 - Método de cálculo 3 protótipo sem malha



Fonte: Autora, 2026.

$$Vrd1 = [\tau rd.k. (1,2 + 40.\rho1)]. Ac$$

$$Ac \left(\frac{(10cm + 20cm) \times 5cm}{2} \right) + (8cm \times 10cm) = 155cm^2$$

$$Vrd1 = [0,072kn/cm^2 \cdot 1,49125 \cdot (1,2 + 40 \cdot 0,02)]. 155cm^2$$

$$Vrd1 = 33.28 kN$$

Para a laje com a malha adicional:

Conforme Figura 20, para o cálculo da força cortante nos protótipos que possuíam malha adicional, foi considerado um valor de d , diferente devido as dimensões utilizadas no protótipo. Primeiramente se fez o cálculo conforme a NBR 6118:2023.

$$d = 14cm - 1,5cm - \left(\frac{1,25}{2} \right) cm = 11,875cm$$

$f_c = 29,08$ valor da média obtida no ensaio de compressão.

$$f_{ct} = 0,3 \cdot \frac{f_c^{\frac{2}{3}}}{\gamma_c} = 0,3 \cdot \frac{(29,08MPa)^{\frac{2}{3}}}{1,0} = 2,84MPa = \frac{0,284kN}{cm^2}$$

$$\tau rd = 0,25 \cdot f_{ct} = 0,25 \cdot 0,284kN/cm^2 = 0,071kn/cm^2$$

$$k = 1,6 - d = 1,6 - 0,11875 = 1,48125$$

$$\rho_1 = \frac{As_1}{bw.d} = \frac{(2.0,139cm^2) + (2.1,227cm^2) + (0,3122cm^2)}{10cm . 11,875cm} = 0,0256 < 0,02$$

Usa-se para $\rho_1 = 0,02$

$$Vrd1 = [0,071kn/cm^2 . 1,48125 . (1,2 + 40.0,02)] . 10.11.875$$

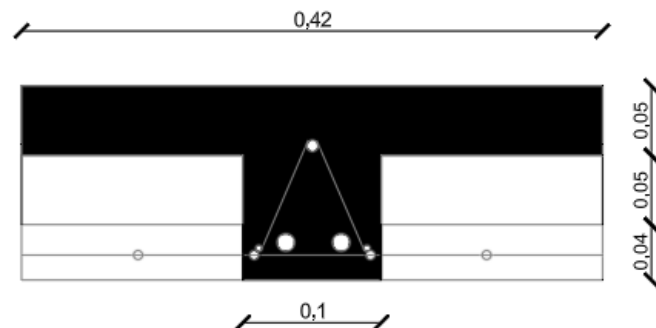
$$Vrd1 = 24,98 \text{ kN}$$

Considerando a carga última média obtida experimentalmente para os protótipos de lajes treliçadas com armadura adicional, igual a 43,30 kN, verificou-se que os modelos apresentaram uma resistência 73,34% superior à força cortante estimada pelos cálculos teóricos.

1º Método, considerando a área total da capa mais a nervura:

Neste método utilizado para realização do cálculo, considera-se a área de concreto da mesa e da nervura, conforme Figura 39.

Figura 35 - Método de cálculo 1 protótipo com malha



Fonte: Autora, 2026.

$$Vrd1 = [\tau_{rd} . k . (1,2 + 40 . \rho_1)] . Ac$$

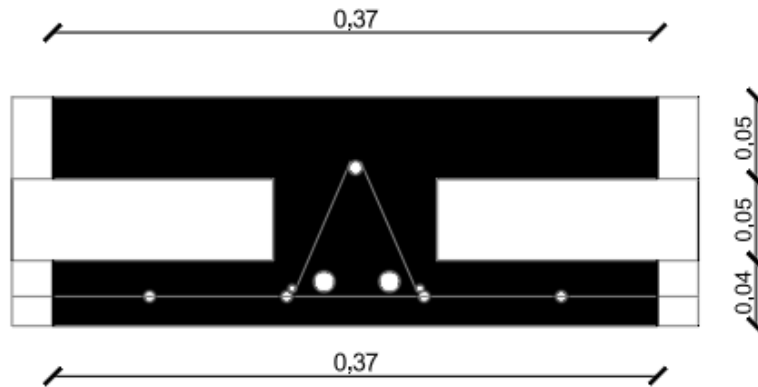
$$Ac = (42cm \times 5cm) + (9cm \times 10cm) = 300cm^2$$

$$Vrd1 = [0,071kn/cm^2 . 1,48125 . (1,2 + 40.0,02)] . 300$$

$$Vrd1 = 63,10 \text{ kN}$$

2º Método, considerando a área da capa e da mesa, Figura 40:

Figura 36 - Método de cálculo 2 protótipo com malha



Fonte: Autora, 2026.

$$Vrd1 = [\tau rd.k. (1,2 + 40.\rho1)]. Ac$$

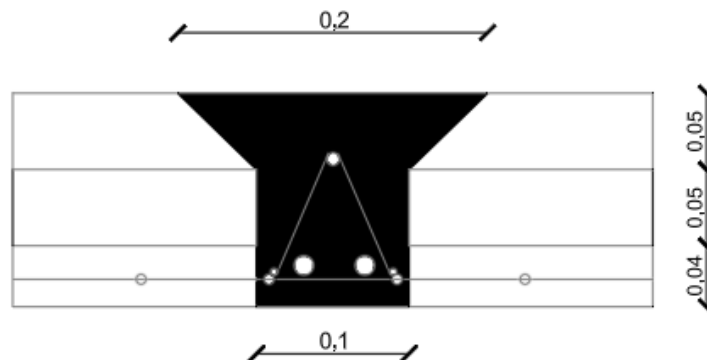
$$Ac = (37cm \times 5cm) + (10cm \times 5cm) + (37cm \times 4cm) = 383cm^2$$

$$Vrd1 = [0,071kn/cm^2 \cdot 1,48125 \cdot (1,2 + 40.0,02)]. 383cm^2$$

$$Vrd1 = 80,56 kN$$

3º Método, considerando um ângulo de 45° na capa e a área da nervura, Figura 41:

Figura 37 - Método de cálculo 3 protótipo com malha



Fonte: Autora, 2026.

$$Vrd1 = [\tau rd.k. (1,2 + 40.\rho1)]. Ac$$

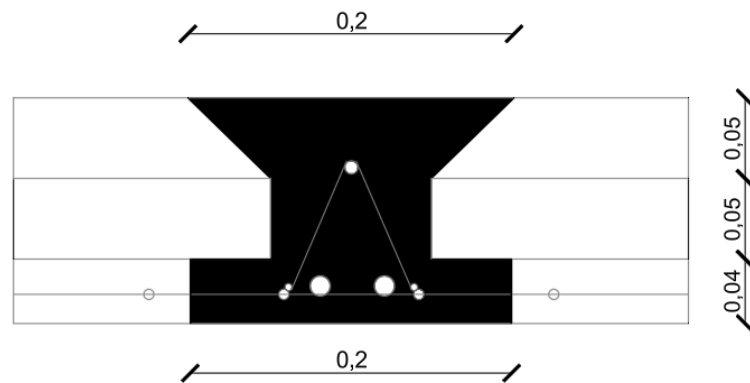
$$Ac = \left(\frac{(10cm + 20cm) \times 5cm}{2} \right) + (9cm \times 10cm) = 165cm^2$$

$$V_{rd1} = [0,071 \text{ kn/cm}^2 \cdot 1,48125 \cdot (1,2 + 40 \cdot 0,02)] \cdot 165 \text{ cm}^2$$

$$V_{rd1} = 34,71 \text{ kN}$$

4º Método, considerando um ângulo de 45° na mesa, capa e a área da nervura, Figura 42:

Figura 38 - Método de cálculo 4 protótipo com malha



Fonte: Autora, 2026.

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

$$A_c \left(\frac{(10 \text{ cm} + 20 \text{ cm}) \times 5 \text{ cm}}{2} \right) + (20 \text{ cm} \times 4 \text{ cm}) + (10 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}) = 205 \text{ cm}^2$$

$$V_{rd1} = [0,071 \text{ kn/cm}^2 \cdot 1,48125 \cdot (1,2 + 40 \cdot 0,02)] \cdot 205 \text{ cm}^2$$

$$V_{rd1} = 43,12 \text{ kN}$$

6. RESULTADOS

Esse capítulo apresenta com base nos ensaios realizados, os resultados e a análise deles referente a resistência ao cisalhamento dos dois modelos de lajes nervuradas treliçadas ensaiados.

6.1. Resultados Experimentais

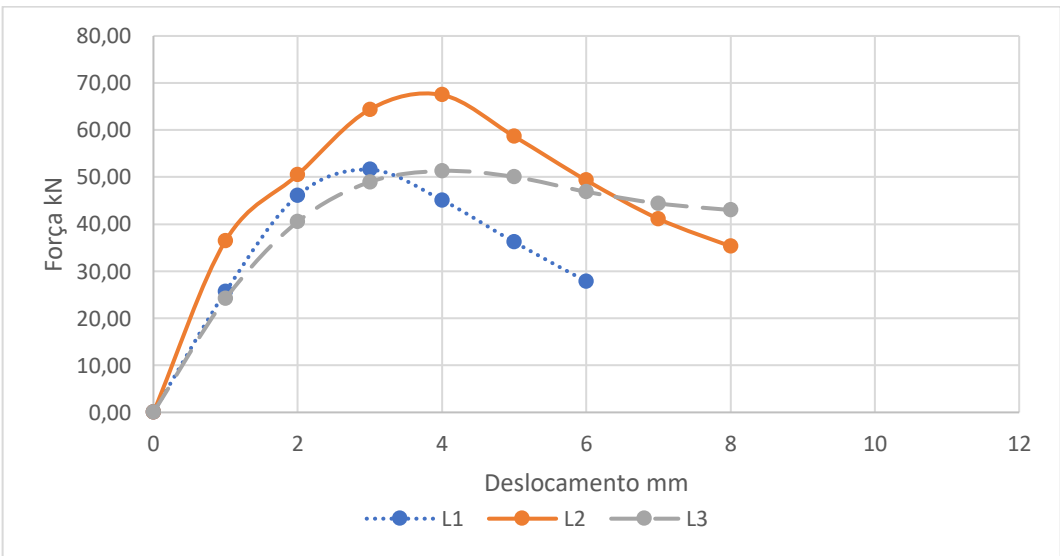
Após realizado os ensaios de cisalhamento nos protótipos das lajes, foram coletados dados dos carregamentos aplicados e as deformações de cada protótipo até a ruptura. Desse modo, obteve-se os resultados demonstrados nas Tabelas 11 e 12, e nos Gráficos 1 e 2, sendo que a ruptura ocorreu sete dias após a concretagem da capa e 14 dias após a concretagem da mesa.

Tabela 11 - Resultado dos ensaios protótipos lajes sem malha adicional

Laje Treliçada	Força máxima (kN)	Cortante experimental (kN)	Média experimental (kN)	Desvio Padrão (kN)	Coeficiente de variação (%)
L1	53,02	26,51	29,035	4,97396	17%
L2	69,53	34,765			
L3	51,66	25,83			

Fonte: Autora, 2026.

Gráfico 1 – Resultado dos ensaios protótipo laje sem malha adicional



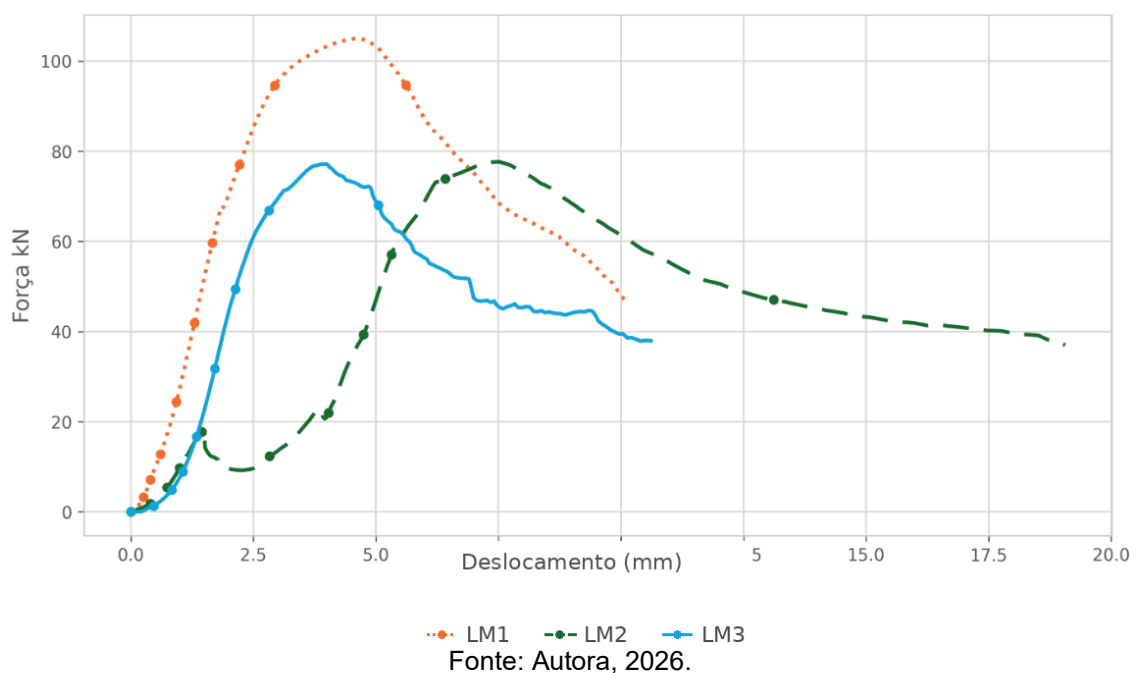
Fonte: Autora, 2026.

Tabela 12 - Resultado dos ensaios protótipo laje com malha adicional

Laje Trelaçada	Força máxima (kN)	Cortante experimental (kN)	Média experimental (kN)	Desvio Padrão (kN)	Coefficiente de variação (%)
LM1	105	52,5	43,30666667	7,962641	18%
LM2	77,67	38,835			
LM3	77,17	38,585			

Fonte: Autora, 2026

Gráfico 2 - Resultado dos ensaios protótipos laje com malha adicional



6.2. Resultados teóricos

A resistência ao cisalhamento das lajes foi calculada utilizando a metodologia prescrita pela NBR 6118:2023 e três modelos distintos para os protótipos sem a malha adicional e quatro modelos para o protótipo com a malha, que estão propostos ao longo deste trabalho.

Para o modelo normativo da NBR 6118:2023 foram obtidos valores de resistência ao cisalhamento de 23,35kN para as lajes sem a malha adicional e 24,98kN para as lajes com a malha adicional. Conforme pode ser visto na Tabela 13, juntamente com os demais métodos utilizados para os cálculos:

Tabela 13 - Resultados obtidos nos diferentes métodos de cálculo

Método	Sem malha (kN)	Com malha (kN)
NBR 6118:2023	23,35	24,98
Método 1	62,27	63,1
Método 2	74,3	80,56
Método 3	33,28	34,71
Método 4	-	43,12

Fonte: Autora, 2026.

Observa-se que os métodos avaliados apresentam comportamentos distintos, enquanto o modelo sugerido pela NBR 6118:2023 resultou em valores inferiores aos observados experimentalmente, os métodos 1 e 2 apresentam valores superiores aos experimentais. Já os métodos 3 e 4 obteve-se um resultado mais próximo do obtido nos ensaios.

7. ANÁLISE DOS RESULTADOS

O presente capítulo apresenta a análise comparativa entre os resultados experimentais e os resultados teóricos obtidos pelos diferentes modelos de cálculo utilizados para a estimativa da resistência ao cisalhamento dos protótipos das lajes nervuradas.

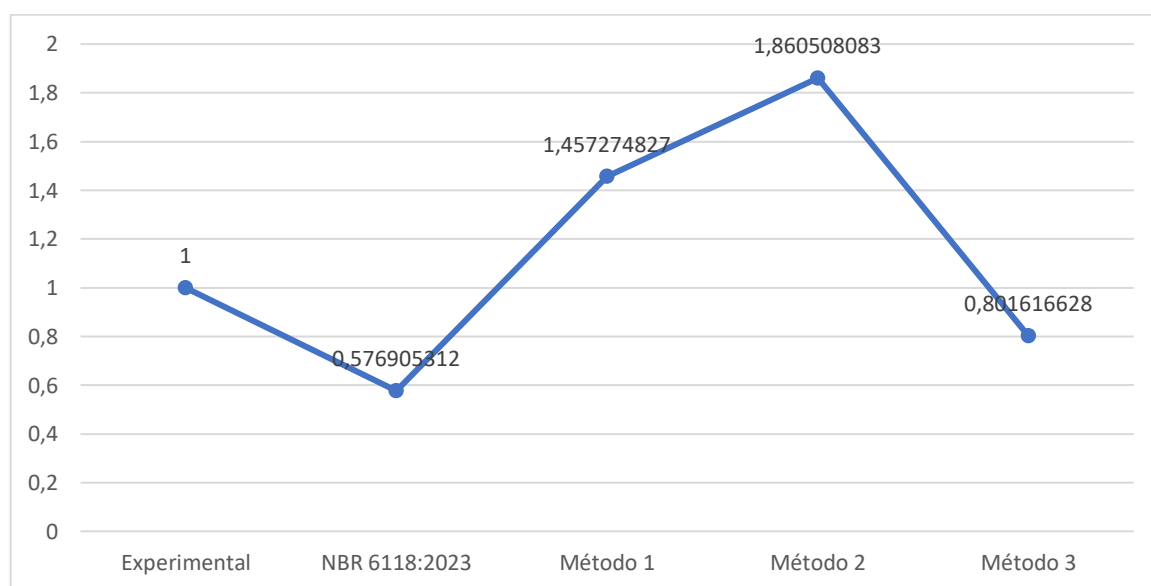
Calculou-se força cortante estimada de ruptura V_{rd1} , para os protótipos com e sem a malha adicional considerando o fator de minoração $\gamma_c = 1,0$, demonstrado no item 5.7.1 deste trabalho, utilizando-se os valores reais de resistência do concreto obtidos através da média dos ensaios dos CP's, de modo que os cálculos apresentassem o valor de ruptura próximo ao real.

Após aplicou-se mais quatro métodos de cálculos a fim de comparar os resultados obtidos através do cálculo da NBR 6118:2023.

7.1. Análise dos resultados de ruptura experimentais por força cortante nas lajes treliçadas sem a malha comparadas aos demais resultados

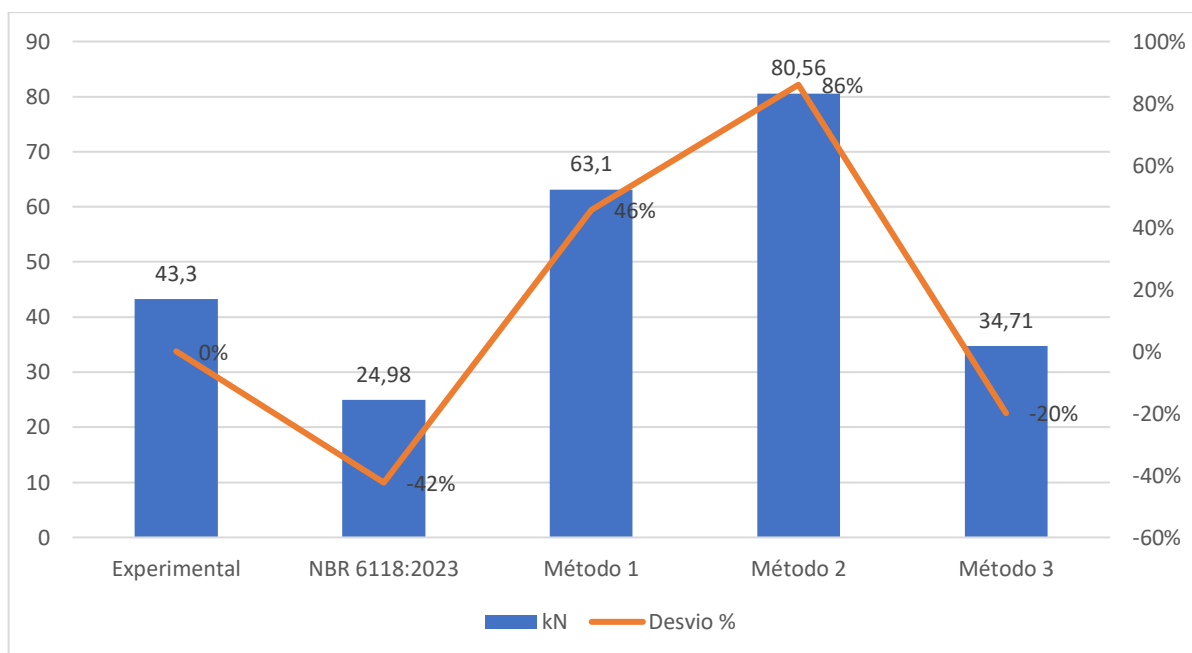
Os Gráficos 3 e 4, apresentam a comparação entre os resultados experimentais obtidos para os protótipos de lajes treliçadas sem malha adicional, sua média experimental e os valores estimados pelos diferentes modelos teóricos avaliados.

Gráfico 3 - Relação entre resultados teóricos e resultados experimentais do protótipo de laje sem malha adicional



Fonte: Autora, 2026.

Gráfico 4 -Desvio em % dos resultados experimentais e métodos de cálculo do protótipo de laje sem malha adicional



Fonte: Autora, 2026.

Observa-se que a resistência média experimental ao cisalhamento dos protótipos sem malha foi de 29,035 kN. Quando comparada ao valor calculado pelo modelo convencional da NBR 6118:2023, igual a 23,35 kN, verifica-se que os protótipos apresentaram resistência de aproximadamente 24,35% superior à prevista teoricamente.

Esse resultado demonstra que o modelo normativo apresentou comportamento conservador para os elementos analisados, subestimando a resistência observada experimentalmente. Tal comportamento é desejável do ponto de vista da segurança estrutural, porém indica que a metodologia utilizada não representa integralmente os mecanismos resistentes desenvolvidos pelas lajes ensaiadas.

Ao analisar os métodos alternativos propostos, conforme gráfico verifica-se que os Métodos 1 e 2 apresentaram valores significativamente superior aos resultados experimentais, estimando resistências de 62,27 kN e 74,30 kN, respectivamente.

Essas diferenças correspondem a acréscimos de 114,35% e 155,77% em relação à média experimental, demonstrando que a consideração integral da mesa e da capa de concreto resulta em superestimação da capacidade resistente.

O Método 3 apresentou melhor aproximação, estimando resistência de 33,28 kN, valor apenas 14,56% superior ao resultado experimental.

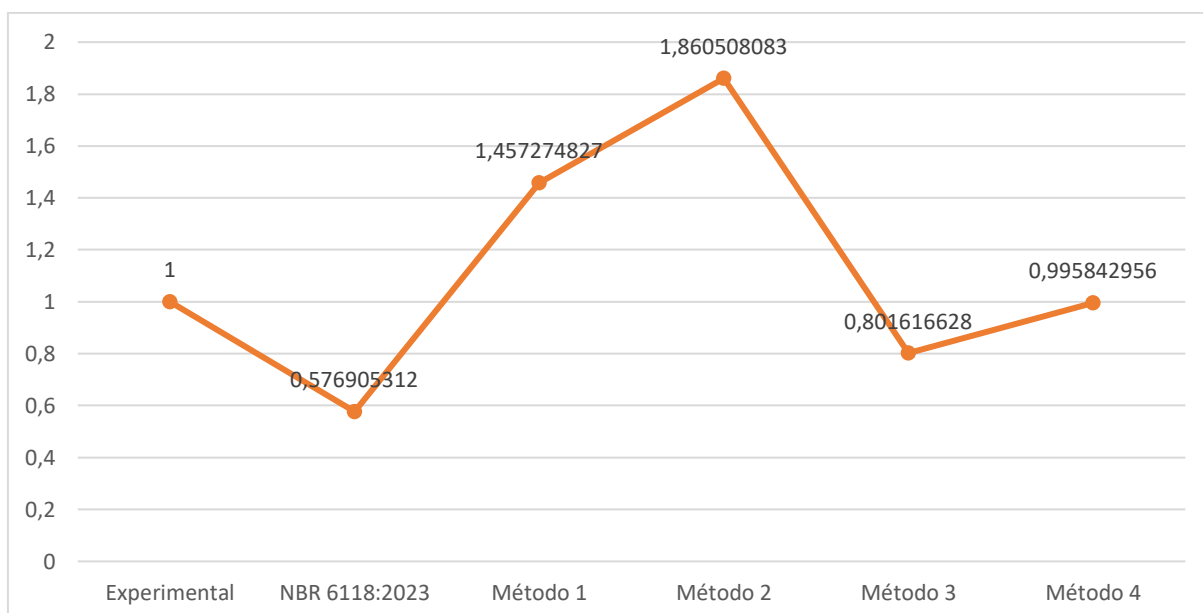
Os resultados indicam que a hipótese adotada no Método 3 representa de forma mais adequada o mecanismo resistente ao cisalhamento das lajes analisadas, sugerindo que apenas uma parcela efetiva da mesa participa da transferência dos esforços cortantes até a ruptura.

Além disso, observou-se durante os ensaios a formação de fissuras inclinadas próximas aos apoios, com inclinação aproximada de 45°, característica típica da ruptura por cisalhamento em elementos de concreto armado. Esse comportamento reforça a hipótese utilizada no Método 3 para definição da área resistente considerada nos cálculos.

7.2. Análise dos resultados de ruptura experimentais por força cortante nas lajes treliçadas com a malha adicional comparadas aos demais resultados

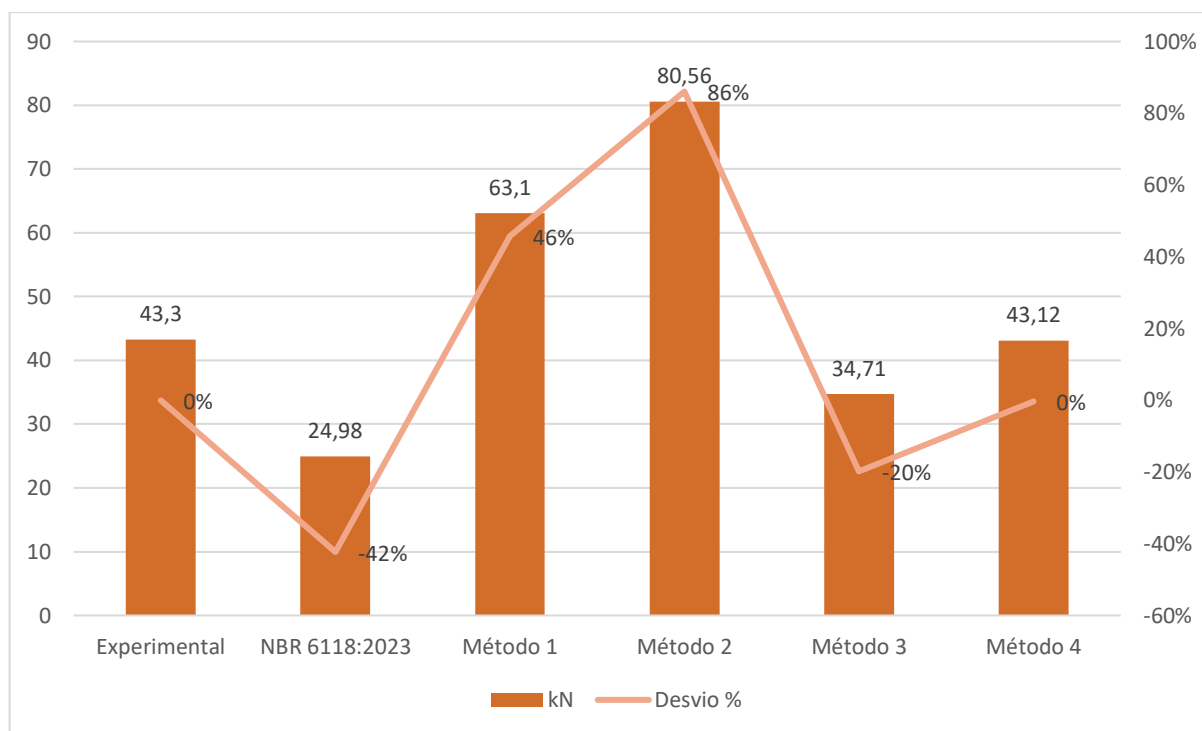
Os Gráficos 5 e 6, apresentam a comparação entre os resultados experimentais obtidos para os protótipos de lajes treliçadas com malha adicional, sua média experimental e os valores estimados pelos diferentes métodos teóricos avaliados.

Gráfico 5 - Relação entre resultados teóricos e resultados experimentais do protótipo de laje com malha adicional



Fonte: Autora, 2026.

Gráfico 6 - Desvio em % dos resultados experimentais e métodos de cálculo do protótipo de laje com a malha adicional



Fonte: Autora, 2026.

Ao analisar os resultados obtidos, observa-se que os protótipos com malha adicional apresentaram resistência média ao cisalhamento de 43,30kN. Esse resultado demonstra um comportamento significativamente superior ao observado nos protótipos sem malha, evidenciando a contribuição da armadura complementar para o aumento da capacidade resistente das lajes.

Quando comparado ao valor calculado pelo modelo convencional da NBR 6118:2023, igual a 24,98kN, verifica-se que a resistência experimental foi aproximadamente 73,34% superior à prevista teoricamente. Essa diferença demonstra que o modelo normativo apresentou comportamento conservador para os elementos estudados, subestimando de forma significativa a resistência observada nos ensaios laboratoriais.

Os Métodos 1 e 2 apresentaram valores teóricos de 63,10kN e 80,56kN, respectivamente. Comparando-se esses resultados com a média experimental obtida, observa-se que ambos superestimaram a resistência ao cisalhamento dos protótipos, apresentando diferenças de 45,73% e 86,05%. Esses resultados indicam que a consideração integral da área da capa e da mesa comprimida conduz a estimativas superiores à capacidade resistente efetivamente mobilizada durante os ensaios.

O Método 3 apresentou resultado intermediário, estimando resistência de 34,71kN. Embora tenha apresentado comportamento mais próximo dos valores experimentais quando comparado aos Métodos 1 e 2, ainda subestimou a resistência observada em aproximadamente 19,84%.

O Método 4 foi o que apresentou melhor aproximação dos resultados experimentais, estimando resistência ao cisalhamento de 43,12kN. A diferença observada em relação à média experimental foi de apenas 0,42%, demonstrando excelente correlação entre o modelo teórico adotado e o comportamento observado em laboratório.

Os resultados indicam que a presença da malha adicional contribuiu significativamente para o aumento da resistência ao cisalhamento, proporcionando maior participação da capa de concreto no mecanismo resistente da laje. Além disso, verificou-se que o Método 4 foi capaz de representar adequadamente essa contribuição, apresentando resultados praticamente coincidentes com os obtidos experimentalmente.

Durante os ensaios também foram observadas fissuras inclinadas próximas às regiões de apoio, características do mecanismo de ruptura por cisalhamento. Entretanto, os protótipos com malha apresentaram maior capacidade de redistribuição das tensões antes da ruptura, comportamento que contribuiu para os maiores valores de resistência observados quando comparados aos protótipos sem malha adicional.

7.3. Modo de ruptura dos protótipos

Após a realização dos ensaios experimentais, foram analisados os modos de ruptura apresentado pelos protótipos. Em todos os casos observou-se o surgimento inicial de fissuras na região carregada. Com o aumento do carregamento, essas fissuras evoluíram até o desenvolvimento das fissuras inclinadas a aproximadamente 45° em direção aos apoios onde houve o rompimento. Analisando essas fissuras pode-se concluir que tratam de fissuras causadas por cisalhamento.

7.3.1. Modo ruptura dos protótipos sem a malha adicional

Figura 39 - Ruptura protótipo laje L1



Fonte: Autora, 2026.

Figura 40 - Ruptura protótipo laje L2



Fonte: Autora, 2026.

Figura 41 - Ruptura protótipo laje L3



Fonte: Autora, 2026.

7.3.2. Modos ruptura dos protótipos com malha adicional

Figura 42 - Ruptura protótipo laje LM1



Fonte: Autora, 2026.

Figura 43 - Ruptura protótipo laje LM2



Fonte: Autora, 2026.

Figura 44 - Ruptura protótipo laje LM3



Fonte: Autora, 2026

8. CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo analisar a resistência à força cortante em lajes pré-moldadas com painéis treliçados, por meio da comparação entre resultados experimentais e diferentes metodologias de cálculo. Para isso, foram realizados ensaios de ruptura por cisalhamento em seis protótipos de lajes nervuradas, além da caracterização mecânica dos materiais utilizados, permitindo avaliar o comportamento estrutural dos elementos estudados.

Os resultados experimentais demonstraram que a utilização de malha adicional proporcionou aumento significativo da resistência ao cisalhamento e melhora o engrenamento. Enquanto os protótipos sem malha apresentaram resistência média de 29,05kN, os protótipos com malha atingiram resistência média de 43,30kN, representando um acréscimo aproximado de 49,10%. Esse comportamento evidencia a contribuição da armadura complementar para a redistribuição das tensões e para o aumento da capacidade resistente das lajes analisadas.

A comparação entre os resultados experimentais e os valores obtidos pelo procedimento convencional da NBR 6118:2023 mostrou que o modelo normativo apresentou comportamento conservador para ambos os grupos de protótipos. Embora essa característica seja importante do ponto de vista da segurança estrutural, verificou-se que os valores calculados ficaram significativamente abaixo daqueles observados nos ensaios, especialmente para as lajes com malha adicional.

Entre os métodos alternativos avaliados, verificou-se que os modelos que consideram toda a área da mesa e da capa de concreto superestimaram a resistência ao cisalhamento, não representando adequadamente o comportamento observado experimentalmente. Por outro lado, o método que considerou uma área resistente composta pela nervura associada a uma parcela efetiva da capa delimitada por linhas inclinadas a 45° apresentou os resultados mais próximos dos valores obtidos em laboratório, com diferenças inferiores a 3% para ambos os grupos analisados.

Os resultados obtidos indicam que a capa e a mesa de concreto participam de forma significativa do mecanismo resistente ao cisalhamento das lajes pré-moldadas estudadas. Dessa forma, a consideração apenas da nervura, conforme adotado no procedimento convencional, pode não representar integralmente o comportamento resistente desses elementos estruturais.

Por fim, conclui-se que a metodologia proposta no Método 3 para os protótipos sem malha e o Método 4 para a laje com malha, apresentaram melhor correlação com os resultados experimentais, demonstrando potencial para representar de maneira mais adequada a resistência ao cisalhamento das lajes analisadas. Além de que a ruptura dos protótipos confirma os métodos que foram adotados para cálculo devido a maneira em que as fissuras se formaram.

Recomenda-se, para trabalhos futuros, a realização de novos ensaios com diferentes geometrias, alturas de capa, taxas de armadura e dimensões de nervuras, bem como a ampliação do número de protótipos avaliados, de forma a aumentar a base experimental disponível e aprofundar o conhecimento sobre os mecanismos resistentes envolvidos.

REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, José Milton de. **Curso de concreto armado**. 4. ed. Rio Grande: Dunas, 2014. V. 1- 4
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 6118:2023 – **Projeto de estruturas de concreto** – Procedimento, Rio de Janeiro. 2023. 260.
- BASTOS, Paulo Sérgio dos Santos. **Dimensionamento de vigas de concreto armado à força cortante**. Notas de aula do curso de Engenharia Civil. Bauru: UNESP, 2025.
- CARVALHO, R. C.; FIGUEIREDO, J. R. Filho. **Cálculo e Detalhamento de Estruturas Usuais de Concreto Armado** – Segundo a NBR 6118:2014. 4. ed. São Carlos: EdUFSCar, 2014. 415 p.
- DONIN, Christian. **Análise numérica de lajes nervuradas por meio do método dos elementos finitos**. 2007. 138 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.
- Estruturas de Concreto Armado II – **Lajes de Concreto**. Notas de aula do curso de Engenharia Civil. Santa Cruz do Sul: UNISC, 2024.
- Estruturas de Concreto I - Flexão Normal Simples - **Vigas**. Notas de aula do curso de Engenharia Civil. Bauru: UNESP, 2025.
- ESPAÑA, Ministerio de Fomento. EF-96 – **Instrucción para el proyecto y la ejecución de forjados unidireccionales de hormigón armado o pretensado**. Madrid, 1997
- FERREIRA, C. A. F.; LIMA, A. J. S.; DELALIBERA, R. G. **Otimização estrutural de lajes pré-moldadas treliçadas protendidas e não protendidas**. Revista Engenharia e Construção Civil, Universidade Federal de Uberlândia (UFU), v. 12, n. 1, p. 45–60, 2019. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/cieng/article/view/39819>. Acesso em: 11 out. 2025.
- NBR 14859-1: **Lajes pré-fabricadas de concreto – Parte 1: Vigotas, minipainéis e painéis** – Requisitos. Rio de Janeiro, 2016.
- Lajes de concreto. Notas de aula do curso de Engenharia Civil. Bauru: UNESP, 2023.
- LAJES.COM.BR. **Lajes treliçadas: características, vantagens e aplicações**. São Paulo: Lajes.com.br, 2023. Disponível em: <https://www.lajes.com.br/lajes-trelicadas/> . Acesso em: 11 out. 2025.

LEONHARDT, F.; MÖNNIG, E. **Construções de concreto**. Rio de Janeiro: Interciência, 1977. 273 p., v. 1

NBR 14859-2: **Lajes pré-fabricadas de concreto – Parte 2: Elementos inertes para enchimento e fôrma** – Requisitos. Rio de Janeiro, 2016.

NBR 14859-3: **Lajes pré-fabricadas de concreto – Parte 3: Armadura treliçada eletrossoldada para lajes pré-fabricadas** – Requisitos. Rio de Janeiro, 2024.

SILVA, Marcos Alberto Ferreira da. **Projeto e construção de lajes nervuradas de concreto armado**. 2005. 239 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2005.

ANEXO A – Relatório do ensaio experimental da laje L1

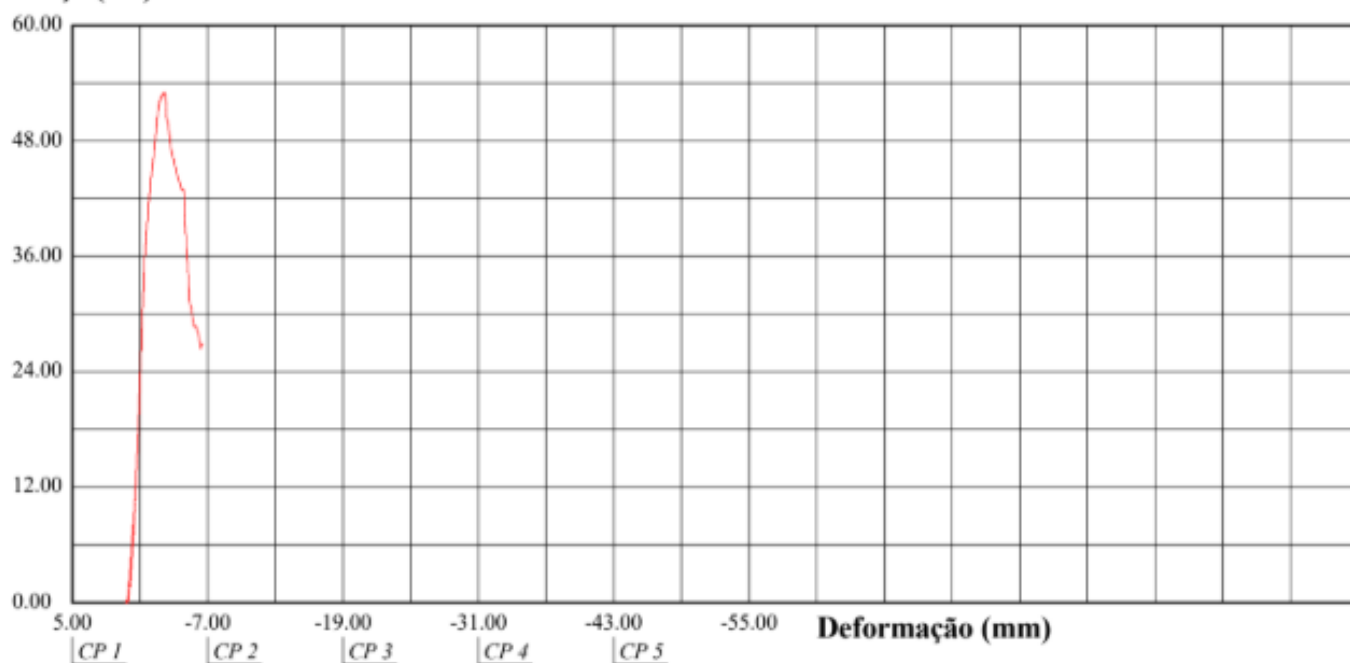
Relatório de Ensaio

Método de Ensaio: **Ensaio Flexão Lajes**

[illegible]

Corpo de Prova	Área (mm ²)	Força Máxima (kN)	Resistência Compressão (MPa)	Tempo Ensaio (s)	Incremento de Tensão (MPa/s)
CP 1	79	53	675.04	136	4.87
Número CPs	1	1	1	1	1
Média	78.54	53.02	675.0	136.0	4.873
Mediana	78.54	53.02	675.0	136.0	4.873
Desv.Padrão	*	*	*	*	*
Coef.Var.(%)	*	*	*	*	*
Mínimo	78.54	53.02	675.0	136.0	4.873
Máximo	78.54	53.02	675.0	136.0	4.873

Força (kN)



ANEXO B – Relatório do ensaio experimental da laje L2

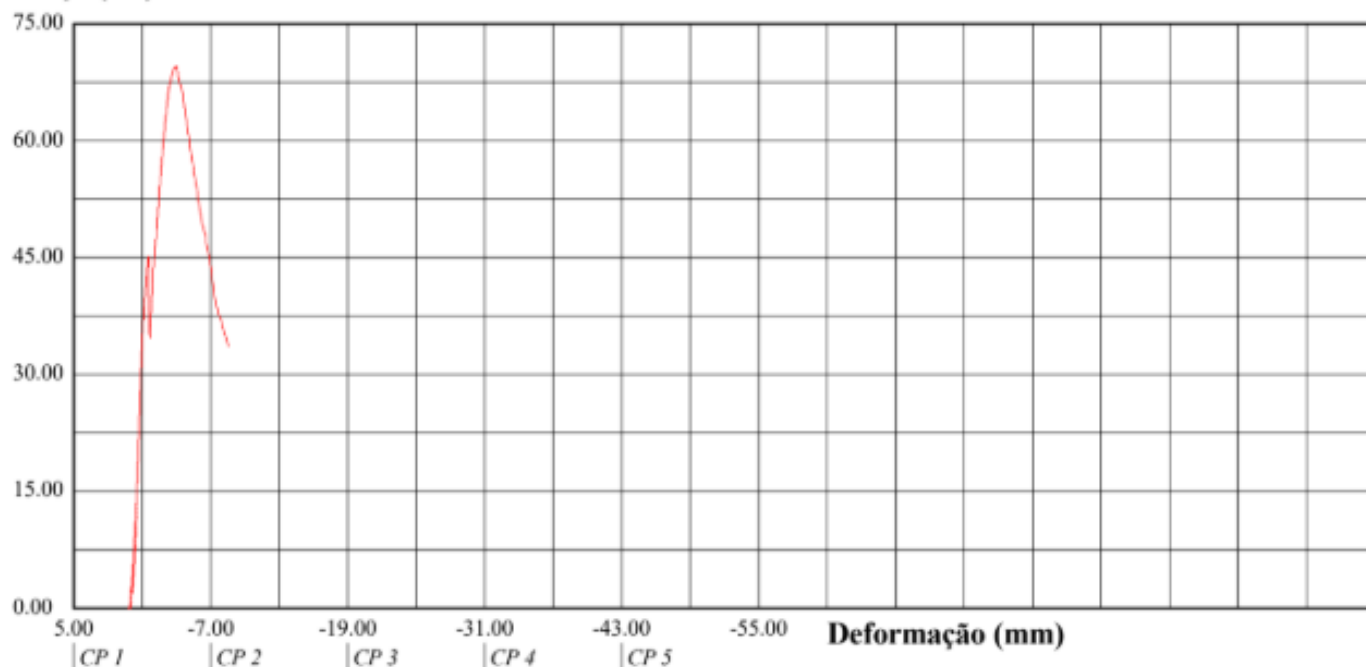
Relatório de Ensaio

Máquina: Emic DL3000N Célula: Trd 29 Extensômetro: - Data: 14/05/2026 Hora: 19:23:43 Trabalho nº 22512
Programa: Tesc versão 3.04 Método de Ensaio: Ensaio Flexão Lajes

Ident. Amostra: >>> Disciplina: Tec Professor(a): Bruna Material : L2

Corpo de Prova	Área (mm ²)	Força Máxima (kN)	Resistência Compressão (MPa)	Tempo Ensaio (s)	Incremento de Tensão (MPa/s)
CP 1	79	70	885.26	177	4.93
Número CPs	1	1	1	1	1
Média	78.54	69.53	885.3	177.1	4.927
Mediana	78.54	69.53	885.3	177.1	4.927
Desv. Padrão	*	*	*	*	*
Coef. Var. (%)	*	*	*	*	*
Mínimo	78.54	69.53	885.3	177.1	4.927
Máximo	78.54	69.53	885.3	177.1	4.927

Força (kN)



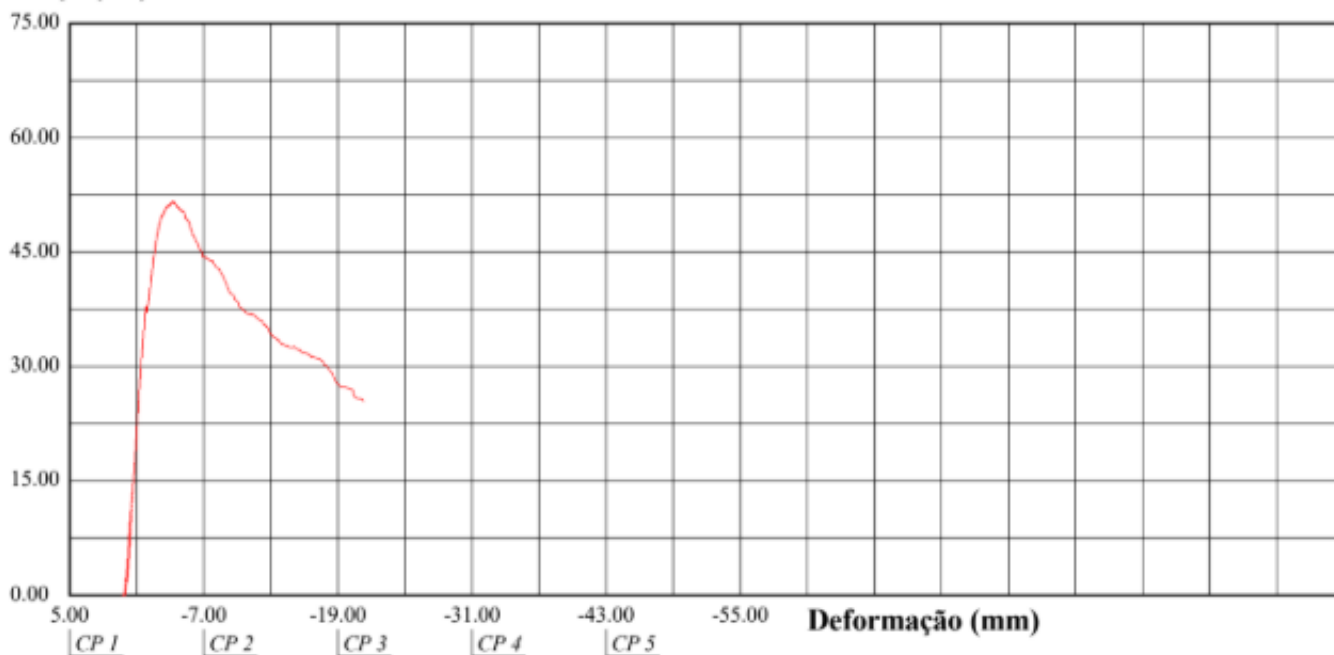
ANEXO C – Relatório do ensaio experimental da laje L3

Relatório de Ensaio

Máquina: **Emic DL3000N** Célula: **Trd 29** Extensômetro: - Data: **14/05/2026** Hora: **19:33:07** Trabalho nº **22513**
Programa: **Tesc versão 3.04** Método de Ensaio: **Ensaio Flexão Lajes**
Ident. Amostra: >>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>> Disciplina: **Tcc** Professor(a): **Bruna** Material : **L3**

Corpo de Prova	Area (mm ²)	Força Máxima (kN)	Resistência Compressão (MPa)	Tempo Ensaio (s)	Incremento de Tensão (MPa/s)
CP 1	79	52	657.80	134	4.81
Número CPs	1	1	1	1	1
Média	78.54	51.66	657.8	134.2	4.807
Mediana	78.54	51.66	657.8	134.2	4.807
Desv. Padrão	*	*	*	*	*
Coef. Var. (%)	*	*	*	*	*
Mínimo	78.54	51.66	657.8	134.2	4.807
Máximo	78.54	51.66	657.8	134.2	4.807

Força (kN)



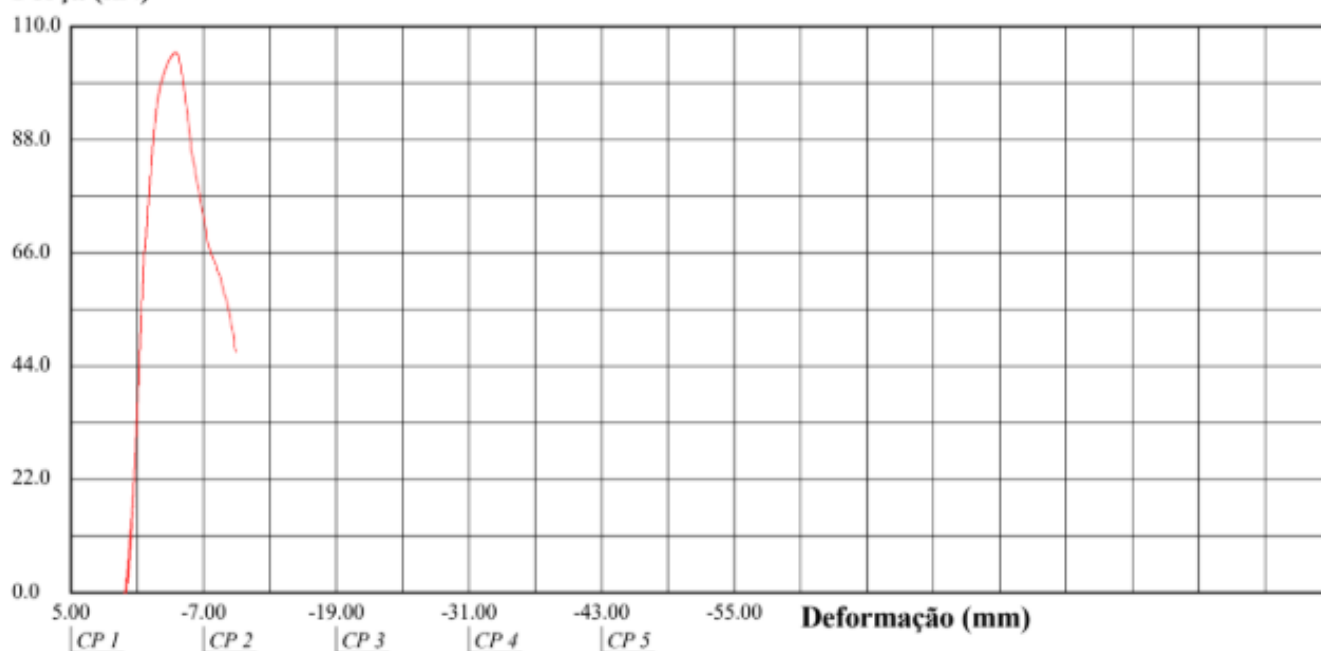
ANEXO D – Relatório do ensaio experimental da laje LM1

Relatório de Ensaio

Máquina: Emic DL3000N Célula: Trd 29 Extensômetro: - Data: 14/05/2026 Hora: 19:41:14 Trabalho nº 22514
Programa: Tesc versão 3.04 Método de Ensaio: Ensaio Flexão Lajes
Ident. Amostra: >>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>> Disciplina: Tcc Professor(a): Bruna Material : LMI

Corpo de Prova	Área (mm ²)	Força Máxima (kN)	Resistência Compressão (MPa)	Tempo Ensaio (s)	Incremento de Tensão (MPa/s)
CP 1	79	105	1336.37	268	4.94
Número CPs	1	1	1	1	1
Média	78.54	105.0	1336	268.0	4.941
Mediana	78.54	105.0	1336	268.0	4.941
Desv. Padrão	*	*	*	*	*
Coef. Var. (%)	*	*	*	*	*
Mínimo	78.54	105.0	1336	268.0	4.941
Máximo	78.54	105.0	1336	268.0	4.941

Força (kN)



ANEXO E – Relatório do ensaio experimental da laje LM2

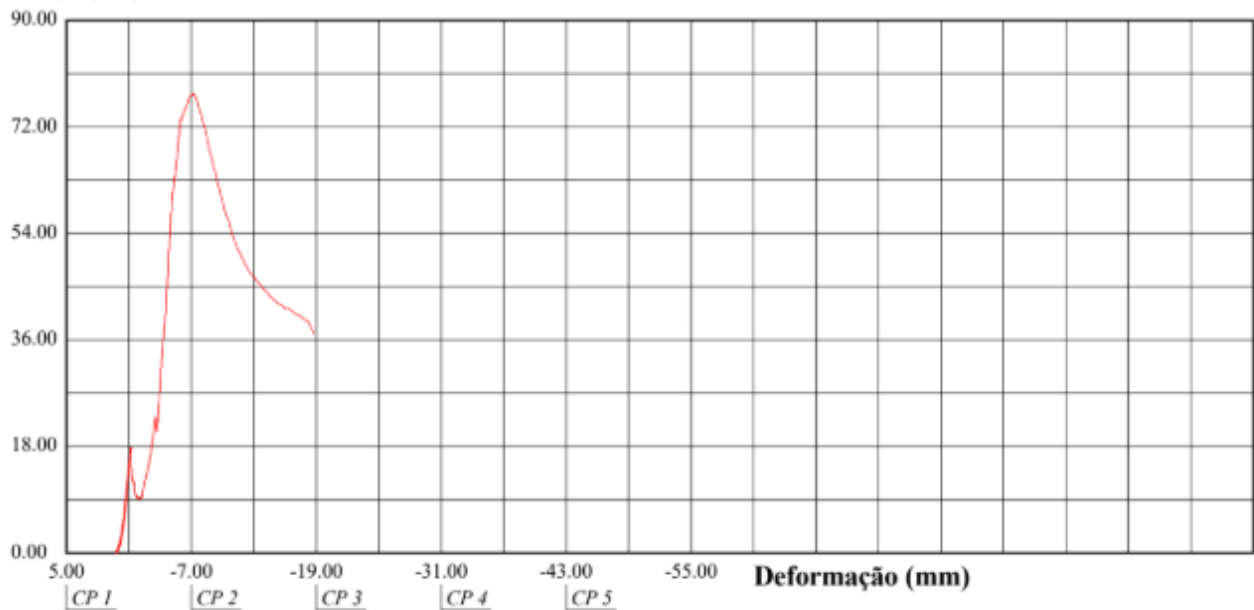
UNISC

Relatório de Ensaio

Máquina: Emic DL3000N Célula: Trd 29 Extensômetro: - Data: 14/05/2026 Hora: 19:51:01 Trabalho nº **22515**
Programa: Tesc versão 3.04 Método de Ensaio: **Ensaio Flexão Lajes**
Ident. Amostra: >>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>> Disciplina: Tec Professor(a): Bruna Material : LM2

Corpo de Prova	Área (mm ²)	Força Máxima (kN)	Resistência Compressão (MPa)	Tempo Ensaio (s)	Incremento de Tensão (MPa/s)
CP 1	79	78	988.94	200	4.88
Número CPs	1	1	1	1	1
Média	78.54	77.67	988.9	200.1	4.880
Mediana	78.54	77.67	988.9	200.1	4.880
Desv. Padrão	*	*	*	*	*
Coef. Var. (%)	*	*	*	*	*
Mínimo	78.54	77.67	988.9	200.1	4.880
Máximo	78.54	77.67	988.9	200.1	4.880

Força (kN)



ANEXO F – Relatório do ensaio experimental da laje LM3

Relatório de Ensaio

Máquina: Emic DL3000N Célula: Trd 29 Extensômetro: - Data: 14/05/2026 Hora: 19:58:59 Trabalho n° 22516
Programa: Tesc versão 3.04 Método de Ensaio: Ensaio Flexão Lajes
Ident. Amostra: >>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>> Disciplina: Tcc Professor(a): Bruna Material : LM3

Corpo de Prova	Área (mm ²)	Força Máxima (kN)	Resistência Compressão (MPa)	Tempo Ensaio (s)	Incremento de Tensão (MPa/s)
CP 1	79	77	982.56	198	4.91
Número CPs	1	1	1	1	1
Média	78.54	77.17	982.6	197.7	4.907
Mediana	78.54	77.17	982.6	197.7	4.907
Desv. Padrão	*	*	*	*	*
Coef. Var. (%)	*	*	*	*	*
Mínimo	78.54	77.17	982.6	197.7	4.907
Máximo	78.54	77.17	982.6	197.7	4.907

Força (kN)

