



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
FACULDADE DE ENGENHARIA
CIVIL



RAFAELE DO NASCIMENTO OLIVEIRA

**INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL DA INFLUÊNCIA DA ARMADURA
SUPLEMENTAR NA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE VIGAS CONTÍNUAS
DE CONCRETO ARMADO COM ESTRIBOS TRELIÇADOS PRÉ-FABRICADOS**

BELÉM

2026

RAFAELE DO NASCIMENTO OLIVEIRA

**INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL DA INFLUÊNCIA DA ARMADURA
SUPLEMENTAR NA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE VIGAS CONTÍNUAS
DE CONCRETO ARMADO COM ESTRIBOS TRELIÇADOS PRÉ-FABRICADOS**

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado
à Faculdade de Engenharia Civil, do Instituto,
de Tecnologia da Universidade Federal do
Pará, como requisito final para obtenção de
grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Maurício de Pina Ferreira

BELÉM

2026

RAFAELE DO NASCIMENTO OLIVEIRA

**INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL DA INFLUÊNCIA DA ARMADURA
SUPLEMENTAR NA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE VIGAS CONTÍNUAS
DE CONCRETO ARMADO COM ESTRIBOS TRELIÇADOS PRÉ-FABRICADOS**

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado
à Faculdade de Engenharia Civil, do Instituto,
de Tecnologia da Universidade Federal do
Pará, como requisito final para obtenção de
grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Maurício de Pina Ferreira

Data da aprovação: ____/____/____

Conceito: _____

Banca Examinadora:

Orientador:

Prof. Dr. Maurício P. Ferreira - UFPA

Examinador:

Prof. Dr. Manoel J. M. Pereira Filho - UFPA

Examinador:

Me. Luamim Sales Tapajós – UFPA

RESUMO

OLIVEIRA, R. N. **Análise experimental da resistência ao cisalhamento unidirecional de vigas de concreto armado com estribos treliçados pré-fabricados**. 2026. 62f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará, Belém.

Os estribos treliçados pré-fabricados são uma alternativa aos estribos convencionais, com potencial para simplificar a montagem das armaduras e melhorar o processo construtivo. Este trabalho investigou experimentalmente a resistência ao cisalhamento de vigas contínuas de concreto armado com estribos treliçados pré-fabricados, com ênfase na influência das armaduras suplementares sobre o comportamento estrutural e a capacidade resistente das vigas. Foram ensaiadas três vigas, sendo uma de referência sem armadura transversal, denominada VR, uma com estribos treliçados pré-fabricados, denominada VW, e uma com estribos treliçados associados a armaduras suplementares, denominada VW+. Os resultados indicaram aumentos de aproximadamente 76% e 132% na resistência ao cisalhamento das vigas VW e VW+, respectivamente, em comparação com a viga de referência. A viga VW+ apresentou maior controle da fissuração e maior mobilização da armadura transversal, indicando que as armaduras suplementares contribuíram para melhorar as condições de ancoragem dos estribos e limitar os mecanismos de delaminação. As resistências experimentais também foram comparadas com as estimativas da ABNT NBR 6118, do ACI 318 e do Eurocode 2. Para os modelos ensaiados, o Modelo I da ABNT NBR 6118 e o ACI 318 forneceram estimativas conservadoras, enquanto o Modelo II da ABNT NBR 6118 e o Eurocode 2 apresentaram resultados não conservadores. Nas condições avaliadas, os resultados indicaram que o emprego de armaduras suplementares pode aumentar a eficiência dos estribos treliçados pré-fabricados e melhorar o comportamento ao cisalhamento de vigas contínuas de concreto armado.

Palavras-chave: Armadura de cisalhamento; Armaduras suplementares; Vigas contínuas; Ancoragem; Delaminação; Resistência ao cisalhamento.

ABSTRACT

OLIVEIRA, R. N. **Análise experimental da resistência ao cisalhamento unidirecional de vigas de concreto armado com estribos treliçados pré-fabricados**. 2026. 62f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará, Belém.

Prefabricated lattice stirrups are an alternative to conventional stirrups, with the potential to simplify reinforcement assembly and improve the construction process. This study experimentally investigated the shear strength of reinforced concrete continuous beams with prefabricated lattice stirrups, emphasizing the influence of supplementary reinforcement on the structural behavior and load-carrying capacity of the beams. Three beams were tested: a reference beam without transverse reinforcement, designated VR; a beam with prefabricated lattice stirrups, designated VW; and a beam with prefabricated lattice stirrups associated with supplementary reinforcement, designated VW+. The results indicated increases of approximately 76% and 132% in the shear strength of the VW and VW+ beams, respectively, compared with the reference beam. The VW+ beam exhibited improved crack control and greater mobilization of the transverse reinforcement, indicating that the supplementary reinforcement contributed to improving the anchorage conditions of the stirrups and limiting delamination mechanisms. The experimental strengths were also compared with the predictions of ABNT NBR 6118, ACI 318, and Eurocode 2. For the tested models, ABNT NBR 6118 Model I and ACI 318 provided conservative predictions, whereas ABNT NBR 6118 Model II and Eurocode 2 yielded non-conservative results. Under the evaluated conditions, the results indicated that the use of supplementary reinforcement can increase the efficiency of prefabricated lattice stirrups and improve the shear behavior of reinforced concrete continuous beams.

Keywords: Shear reinforcement; Supplementary reinforcement; Continuous beams; Anchorage; Delamination; Shear strength.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Mecanismos de transferência do cisalhamento.....	15
Figura 2 - Mecanismo de engrenamento dos agregados	17
Figura 3 - Efeito pino.....	18
Figura 4 – Efeito arco.....	19
Figura 5 – Tipos de carregamento para definição do vão de cisalhamento	20
Figura 6 - Comportamento de uma viga com armadura transversal	21
Figura 7 – Verificação quanto aos estados limites em vigas com armadura transversal	22
Figura 8 – Ancoragem das armaduras transversais	23
Figura 9 – Procedimento de montagem dos estribos treliçados pré-fabricados.....	24
Figura 10 – Modelo resistente adotado pela ABNT NBR 6118:2026	30
Figura 11 – Modelo resistente.....	31
Figura 12 – Recomendações para ancoragem de estribos	33
Figura 13 – Geometria geral e detalhamento da armadura longitudinal das vigas.	35
Figura 14 – Estribo treliçado pré-fabricado.....	37
Figura 15 – Armadura de cisalhamento das vigas.....	38
Figura 16 – Armadura suplementar de combate à delaminação	38
Figura 17 – concretagem das vigas.	39
Figura 18 – Instrumentação das vigas experimentais	41
Figura 19 – Instrumentação da armadura transversal	41
Figura 20 – Sistema de ensaio adotado.	42
Figura 21 – Vista geral do sistema de ensaio.....	42
Figura 22 – Sistema de carregamento, diagrama de momento fletor e diagrama de esforço cortante.	43
Figura 23 – Sistema de medição dos deslocamentos verticais.	44
Figura 24 – Quadros de fissuração das vigas VR, VW e VW+.	49

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1- Deslocamento vertical das vigas ensaiadas	45
Gráfico 2 - Deformações na armadura de flexão e no concreto das vigas ensaiadas	47
Gráfico 3 – Deformação nas armaduras de cisalhamento da viga VW.	48
Gráfico 4 - Deformação na armadura suplementar VW+	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Características das vigas ensaiadas por FERREIRA et al. (2016)	24
Tabela 2 - Características dos espécimes de push-off ensaiados por Tapajós (2017) ...	25
Tabela 3 - Características das vigas ensaiadas por Tapajós (2017)	25
Tabela 4 – Resultados dos ensaios de SOUZA et al. (2023).....	26
Tabela 5 – Parâmetros das vigas.....	27
Tabela 6 – Características geométricas dos modelos experimentais.	36
Tabela 7 – Propriedades mecânicas do concreto.....	39
Tabela 8 – Propriedades do aço.	40
Tabela 9 – Resultados experimentais das vigas VR, VW e VW+	51
Tabela 10 – Comparação das resistências experimentais com as estimativas teóricas .	53

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 - Índice de esbeltez ao cisalhamento.....	19
Equação 2 - Índice de esbeltez ao cisalhamento para vigas contínuas.....	20
Equação 3 - Resistência ao cisalhamento com armadura transversal – Modelo I (ABNT NBR 6118).....	28
Equação 4 - Resistência ao cisalhamento do concreto – Modelo I (ABNT NBR 6118).....	28
Equação 5 - Contribuição da armadura transversal – Modelo I (ABNT NBR 6118).....	28
Equação 6 - Resistência máxima ao cisalhamento da seção (esmagamento das bielas) – Modelo I (ABNT NBR 6118).....	28
Equação 7 - Resistência ao cisalhamento com armadura transversal – Modelo II (ABNT NBR 6118).....	29
Equação 8 - Resistência ao cisalhamento do concreto – Modelo II (ABNT NBR 6118).....	29
Equação 9 - Contribuição da armadura transversal – Modelo II (ABNT NBR 6118).....	29
Equação 10 - Resistência máxima ao cisalhamento da seção (esmagamento das bielas) – Modelo II (ABNT NBR 6118).....	29
Equação 11 - Resistência ao cisalhamento do concreto (Eurocode 2).....	31
Equação 12 - Cálculo do vão efetivo de cisalhamento (Eurocode 2)	31
Equação 13 - Cálculo do vão mecânico de cisalhamento (Eurocode 2).....	31
Equação 14 - Resistência ao cisalhamento do concreto com armadura transversal (Eurocode 2).....	32
Equação 15 - Resistência máxima ao cisalhamento da biela comprimida (Eurocode 2).....	32
Equação 16 - Determinação da inclinação da biela comprimida (Eurocode 2).....	32
Equação 17 - Resistência ao cisalhamento do concreto sem armadura transversal – Expressão 1 (Eurocode 2).....	33
Equação 18 - Resistência ao cisalhamento do concreto sem armadura transversal – Expressão 2 (Eurocode 2).	33
Equação 19 - Resistência ao cisalhamento com armadura transversal (ACI 318).....	34
Equação 20 - Contribuição da armadura transversal para a resistência ao cisalhamento (ACI 318).....	34
Equação 21 - Resistência máxima ao cisalhamento da seção (ACI 318).....	34

LISTA DE SÍMBOLOS

ρ_l	Taxa de armadura longitudinal
ρ_w	Taxa de armadura transversal
φ_w	Diâmetro da armadura transversal
a	Vão de cisalhamento
A_s	Área da seção transversal das armaduras de flexão tracionadas
A_{sw}	Área da seção transversal das armaduras de cisalhamento
b_w	Largura da seção de concreto considerada
d	Altura útil
E_c	Módulo de elasticidade do concreto
f_c	Resistência à compressão do concreto
$f_{ctk,inf}$	Resistência à tração inferior do concreto
f_{ctm}	Resistência à tração média do concreto
f_{ys}	Tensão de escoamento da armadura de flexão
f_{yd}	Tensão de escoamento de cálculo do aço
f_{yw}	Tensão de escoamento da armadura transversal
f_{ywd}	Tensão de escoamento de cálculo da armadura transversal
f_{ywk}	Tensão de escoamento característica da armadura transversal
h	Altura
h_{ef}	Embutimento
k	Efeito de escala
s	Espaçamento entre as camadas de armadura transversal
$V_{R,c}$	Resistência ao cisalhamento sem armadura transversal
$V_{R,s}$	Resistência ao cisalhamento da armadura transversal
$V_{R,cs}$	Resistência ao cisalhamento com armadura transversal
$V_{R,max}$	Resistência máxima ao cisalhamento
$V_{S,d}$	Solicitação do cortante

Sumário

1. INTRODUÇÃO.....	12
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
3. ESTRIBOS TRELIÇADOS PRÉ-FABRICADOS	23
4. RECOMENDAÇÕES NORMATIVAS.....	26
4.1 Abnt Nbr 6118:2026.....	28
4.2 Eurocode 2 (2023).....	30
4.3 Aci 318 (2025).....	33
4.4 Discussão Dos Procedimentos Normativos	34
5. PROGRAMA EXPERIMENTAL	35
5.1 Programa Experimental	35
5.2 Armadura Transversal.....	36
5.3 Materiais.....	38
5.3.1 Concreto	39
5.3.2 Aço.....	40
5.4 Instrumentação Das Vigas.....	40
5.5 Sistema De Ensaio	41
5.6 Procedimento Experimental.....	43
6. RESULTADOS EXPERIMENTAIS	44
6.1 Deslocamento Vertical.....	44
6.2 Deformação Nas Armaduras De Cisalhamento.....	47
6.3 Fissuração	49
6.4 Resistência Ao Cisalhamento	51
7. CONCLUSÃO.....	54
8. REFERÊNCIAS	58

1. INTRODUÇÃO

A resistência aos esforços cortantes constitui um dos aspectos fundamentais no dimensionamento de estruturas de concreto armado, uma vez que a ruptura por cisalhamento apresenta comportamento predominantemente frágil e reduzida capacidade de redistribuição de esforços, podendo comprometer significativamente a segurança estrutural quando não adequadamente considerada em projeto (Lubell et al., 2009; Soltani et al., 2016). Em elementos estruturais submetidos à ação de forças cortantes, a utilização de armaduras transversais desempenha papel essencial no aumento da capacidade resistente, no controle da fissuração e na melhoria do desempenho estrutural, sendo amplamente empregada em vigas de concreto armado (Yasouj et al., 2015; Schmidt et al., 2021). Entretanto, em elementos planos, como lajes e paredes, a adoção de armaduras específicas para resistência ao cisalhamento ainda é limitada por questões construtivas e de detalhamento, fazendo com que, em muitos casos, a segurança seja garantida pelo aumento da espessura do elemento, solução que implica maior consumo de concreto, aumento do peso próprio e elevação dos custos de execução (Tapajós, 2017; Hillebrand, M.; Hegger, J. (2023); Valente et al., 2023).

Embora a utilização de armaduras transversais seja uma prática consolidada em vigas de concreto armado, sua aplicação em elementos planos, como lajes, paredes e vigas-faixa, ainda é pouco frequente em virtude das dificuldades associadas ao detalhamento, à montagem das armaduras e ao processo executivo (Tapajós, 2017; Ferreira et al., 2016). Nessas situações, é comum que a resistência aos esforços cortantes seja garantida pelo aumento da espessura do elemento, permitindo que o próprio concreto absorva as solicitações de cisalhamento sem a necessidade de armaduras específicas (Pinto et al., 2022; Valente et al., 2023). Embora essa estratégia atenda aos requisitos de segurança, sua adoção pode resultar em maior consumo de concreto, aumento do peso próprio da estrutura, elevação das cargas permanentes e, conseqüentemente, maiores custos de execução, além de limitar a obtenção de soluções estruturais mais esbeltas e eficientes (SCHMIDT et al., 2021; Hillebrand, M.; Hegger, J. (2023)). Essas limitações evidenciam que, em determinadas situações, as soluções convencionalmente adotadas podem não representar a alternativa mais racional sob os aspectos estrutural, construtivo e econômico (Tapajós, 2017; Pinto et al., 2022).

Com o objetivo de superar as limitações associadas às soluções convencionais de resistência ao cisalhamento, foram desenvolvidos sistemas de armaduras treliçadas pré-fabricadas capazes de conciliar desempenho estrutural e racionalização construtiva. Em comparação às armaduras transversais tradicionais, esses sistemas apresentam potencial para reduzir o congestionamento de armaduras, facilitar o posicionamento durante a montagem e favorecer o processo de concretagem, contribuindo para a melhoria da produtividade e da qualidade da execução (Ferreira et al., 2016; Tapajós, 2017). Além dos benefícios construtivos, a utilização de armaduras treliçadas possibilita a mobilização eficiente dos mecanismos resistentes ao cisalhamento, constituindo uma alternativa promissora para aplicação em diferentes elementos estruturais de concreto armado (Pinto et al., 2022; Schmidt et al., 2021). Dessa forma, esses sistemas passaram a ser objeto de diversas investigações experimentais destinadas à avaliação de seu comportamento estrutural, de sua capacidade resistente e da viabilidade de sua aplicação em substituição às soluções convencionais (Hillebrand, M.; Hegger, J. (2023); Valente et al., 2023).

O desenvolvimento de armaduras treliçadas pré-fabricadas para resistência ao cisalhamento tem sido objeto de uma linha contínua de pesquisas experimentais voltada à obtenção de soluções estruturalmente eficientes e construtivamente mais racionais. Os primeiros estudos concentraram-se na verificação da viabilidade desse sistema em vigas de concreto armado, demonstrando que a utilização de estribos treliçados poderia proporcionar desempenho resistente compatível com as armaduras transversais convencionais, além de simplificar aspectos relacionados à execução (Ferreira et al., 2016). A continuidade dessas investigações permitiu identificar limitações associadas à ancoragem e à transferência de esforços entre a armadura transversal e o concreto, motivando o aperfeiçoamento progressivo do sistema por meio de novas configurações de armaduras e diferentes estratégias de detalhamento (Tapajós, 2017). Esse processo consolidou as bases experimentais da linha de pesquisa e direcionou os estudos seguintes para o aprimoramento do comportamento estrutural dos elementos armados com estribos treliçados.

A etapa seguinte dessa linha de pesquisa concentrou-se na avaliação da influência das armaduras suplementares e de diferentes configurações de estribos treliçados sobre a resistência ao cisalhamento e os mecanismos de ruptura dos elementos estruturais. Os resultados obtidos evidenciaram que o desempenho do

sistema está diretamente relacionado às condições de ancoragem e à mobilização adequada da armadura transversal, contribuindo para a redução de mecanismos de delaminação e para o aumento da capacidade resistente (Pinto et al., 2022). Posteriormente, a aplicação das armaduras treliçadas foi ampliada para outros elementos estruturais, demonstrando o potencial de utilização desse sistema além das vigas convencionais (Ferreira et al., 2021), enquanto investigações mais recentes aperfeiçoaram a configuração das armaduras e ampliaram a compreensão dos mecanismos resistentes envolvidos (Souza et al., 2023; Valente et al., 2023).

Apesar dos avanços obtidos no desenvolvimento das armaduras treliçadas pré-fabricadas e da evolução alcançada ao longo dessa linha de pesquisa, os estudos experimentais concentraram-se principalmente em elementos estruturais simplesmente apoiados, submetidos à flexão positiva e a condições de carregamento que favoreceram a avaliação do comportamento do sistema em situações convencionais de projeto. Embora essas investigações tenham contribuído significativamente para a compreensão dos mecanismos resistentes, da influência das armaduras suplementares e da eficiência dos diferentes detalhamentos adotados, o comportamento dessas armaduras em elementos estruturais contínuos ainda permanecia pouco conhecido. Nessas estruturas, a redistribuição dos esforços internos, a inversão do diagrama de momentos fletores e a formação de regiões de momento negativo podem modificar a interação entre o concreto e a armadura transversal, influenciando o processo de fissuração, o desenvolvimento dos mecanismos resistentes e a forma de ruptura. Assim, permanecia em aberto a avaliação experimental do desempenho de armaduras treliçadas pré-fabricadas em vigas contínuas com ruptura na região de momento negativo, condição ainda não investigada nos estudos que antecederam o presente trabalho.

O presente trabalho tem por objetivo investigar experimentalmente o comportamento ao cisalhamento de vigas contínuas de concreto armado com estribos treliçados pré-fabricados em formato W associados à armadura suplementar, analisando sua resistência, o processo de fissuração, os mecanismos de ruptura e as deformações desenvolvidas ao longo do carregamento. Para essa finalidade, são avaliados três modelos experimentais representativos de uma campanha de ensaios composta por uma viga de referência sem armadura transversal convencional e duas vigas armadas com estribos treliçados pré-fabricados em diferentes configurações. Como contribuição, este trabalho apresenta

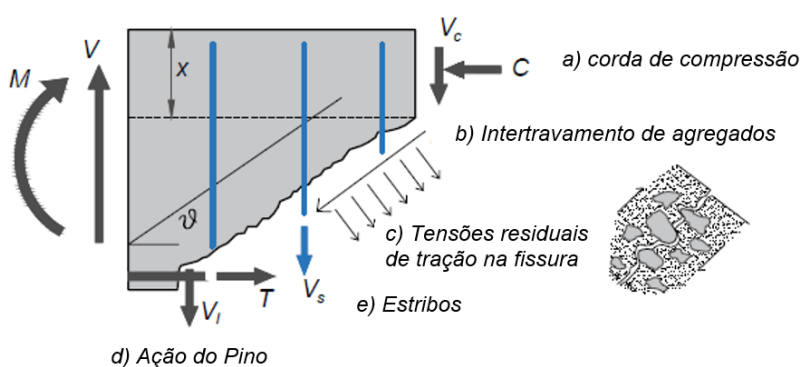
resultados experimentais obtidos em vigas contínuas com ruptura na região de momento negativo e outra em momento positivo, condição de carregamento mais representativa da prática estrutural e ainda não investigada nas pesquisas anteriores dessa linha de estudo, ampliando a compreensão sobre o desempenho dos estribos treliçados pré-fabricados em situações distintas das tradicionalmente avaliadas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O comportamento de elementos de concreto armado submetidos ao cisalhamento constitui um dos temas mais complexos da engenharia estrutural, uma vez que a resistência a esse tipo de solicitação resulta da atuação simultânea de diferentes mecanismos internos de transferência de esforços. Ao contrário da flexão, cujo comportamento é relativamente bem compreendido, a resistência ao cisalhamento depende da interação entre as propriedades do concreto, da armadura e das características geométricas da estrutura, motivo pelo qual os modelos de cálculo adotados pelas normas possuem natureza predominantemente semiempírica (Hu B.; Wu, Y. (2018); Marí, 2024).

Em vigas de concreto armado, a resistência ao cisalhamento é proporcionada pela contribuição conjunta do concreto e da armadura transversal. Antes da formação das fissuras inclinadas, o concreto resiste praticamente sozinho aos esforços cortantes. Após a fissuração, entretanto, diferentes mecanismos passam a atuar simultaneamente, permitindo a continuidade da transferência de esforços até a ruptura da peça. Entre esses mecanismos destacam-se o engrenamento dos agregados, o efeito pino da armadura longitudinal, a contribuição da zona comprimida do concreto e, em elementos pouco esbeltos, o efeito arco.

Figura 1 - Mecanismos de transferência do cisalhamento.

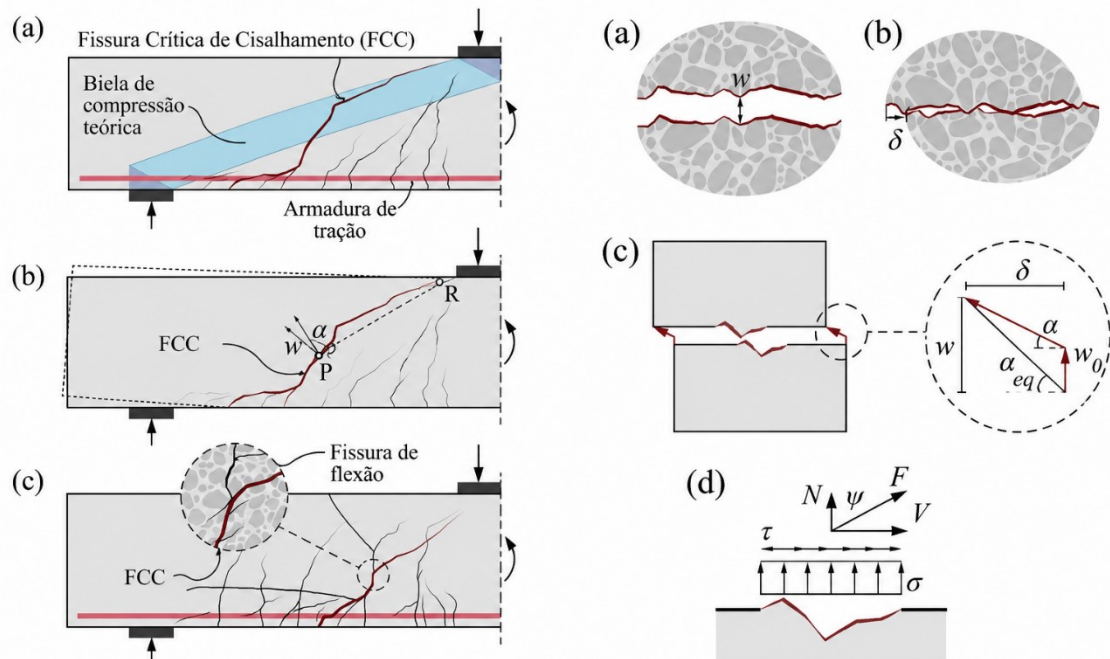


Fonte: Marí, (2024).

Após o surgimento das fissuras, a resistência ao cisalhamento deixa de depender exclusivamente da capacidade resistente do concreto íntegro, passando a ser resultado da atuação conjunta de diferentes mecanismos de transferência de esforços. A contribuição de cada mecanismo varia conforme as características geométricas da peça, as propriedades dos materiais, o nível de fissuração e a presença ou ausência de armadura transversal. Embora existam diferentes interpretações quanto à participação relativa desses mecanismos, a literatura concorda que eles atuam de forma simultânea e suplementar, garantindo a manutenção da capacidade resistente após o início da fissuração (Hu, B.; Wu, Y. (2018)). Marí (2024) ressalta que a interação entre esses mecanismos explica a elevada complexidade do comportamento ao cisalhamento, enquanto Tapajós (2017) destaca que sua contribuição se modifica à medida que o processo de fissuração evolui. De forma semelhante, Sousa (2022) observa que a compreensão desses mecanismos é essencial para o desenvolvimento de modelos analíticos mais representativos e para o aprimoramento das prescrições normativas.

O engrenamento dos agregados constitui um dos principais mecanismos de transferência de esforços em elementos fissurados, ocorrendo pela transmissão de tensões cisalhantes através da superfície irregular das fissuras. Sua eficiência depende, principalmente, da rugosidade da interface, da abertura das fissuras e das características dos agregados utilizados (Taylor, 1970). Estudos desenvolvidos por Walraven (1980), Ulaga (2003) e Sagaseta e Vollum (2011) demonstraram que esse mecanismo exerce contribuição significativa para a resistência ao cisalhamento, especialmente em vigas sem armadura transversal. Nesses elementos, Campana *et al.* (2013) verificaram que o engrenamento dos agregados representa uma das principais parcelas resistentes após o surgimento da fissura crítica de cisalhamento.

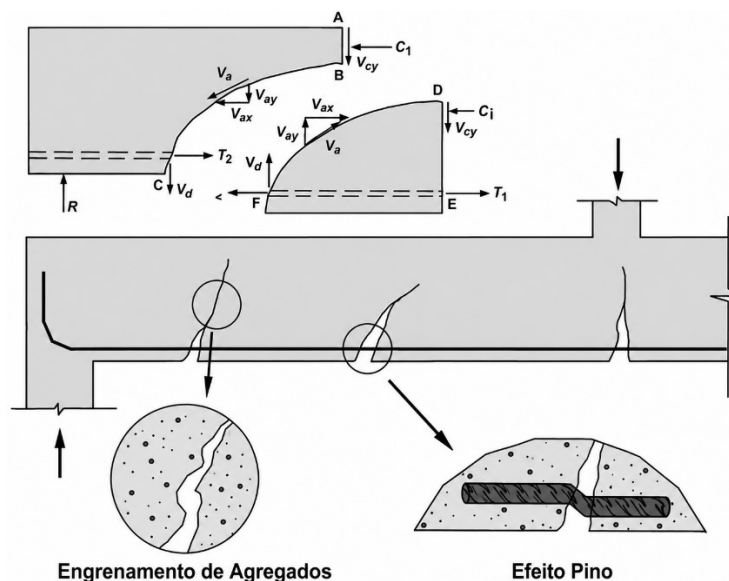
Figura 2 - Mecanismo de engrenamento dos agregados.



Fonte: Adaptado de Tirassa et al, (2020).

Outro mecanismo importante é o efeito pino, associado à participação da armadura longitudinal na transferência de esforços através das fissuras. Esse mecanismo passa a atuar após o desenvolvimento das fissuras de flexão, contribuindo para o aumento da capacidade resistente do elemento (Krefeld; Thurston, 1966). Chana (1987) e Dei Poli *et al.* (1993) confirmaram experimentalmente essa contribuição, enquanto Regan (1971), Campana *et al.* (2013) e Fernández Ruiz *et al.* (2013) observaram que sua eficiência depende das condições de fissuração e da adequada ancoragem das barras longitudinais. Por outro lado, em vigas esbeltas sem armadura transversal, a formação de fissuras de delaminação reduz significativamente a contribuição desse mecanismo, conforme relatado por Jelic *et al.* (1999), Zararis (2003) e Muttoni e Fernández Ruiz (2008).

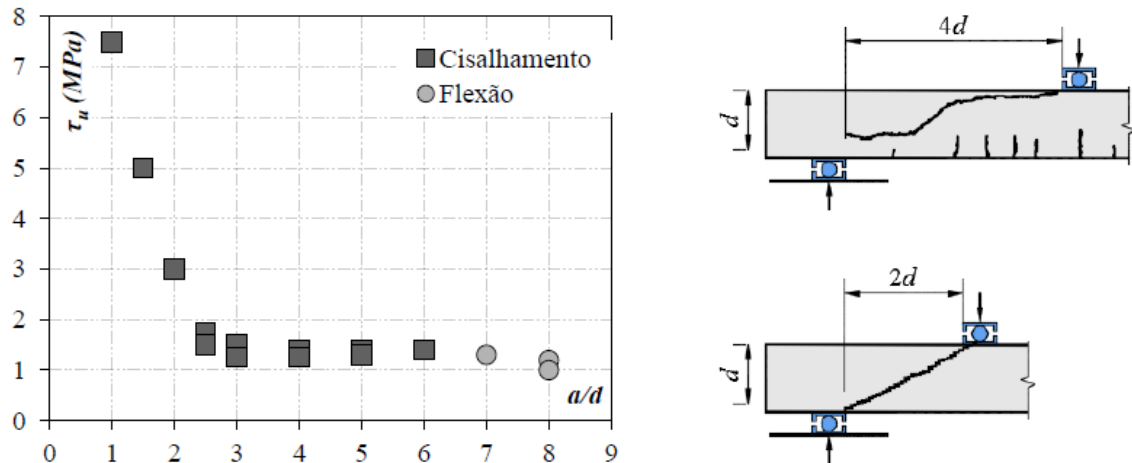
Figura 3 - Efeito pino.



Fonte: Wight e Macgregor, (2012).

Além do engrenamento dos agregados e do efeito pino, outros mecanismos também contribuem para a resistência ao cisalhamento, embora sua participação varie de acordo com as características estruturais do elemento. Entre eles destacam-se a contribuição da zona comprimida do concreto, representada pelo efeito de balanço (Kani, 1964), a tensão residual de tração do concreto fissurado, decorrente do comportamento softening (Hillerborg, A. (1983); Hordijk, 1992), e o efeito arco, que se torna mais significativo em vigas com pequena relação entre o vão de cisalhamento e a altura útil, permitindo que parte da carga seja transferida diretamente aos apoios (Fisker; Hagsten (2016)). Embora esses mecanismos apresentem contribuições distintas, sua atuação conjunta evidencia que a resistência ao cisalhamento resulta da interação entre diferentes parcelas resistentes. Nesse contexto, a presença da armadura transversal exerce papel fundamental na redistribuição dos esforços internos, no controle da fissuração e na manutenção da capacidade resistente após o surgimento das fissuras, assunto abordado na seção seguinte.

Figura 4 – Efeito arco.



Fonte: Adaptado de Fisker e Hagsten, (2016)

As condições de apoio e de carregamento exercem influência significativa no comportamento ao cisalhamento das vigas, pois alteram a distribuição dos esforços internos e o índice de esbeltez ao cisalhamento (λ). Esse parâmetro é definido pela relação entre o momento fletor, o esforço cortante e a altura útil da seção, conforme apresentado na Equação 1, sendo amplamente utilizado para caracterizar a influência da geometria e do carregamento na resistência ao cisalhamento (Tapajós, 2017; Adam *et al.*, 2022).

$$\lambda = \frac{M}{Vd} \quad (\text{Equação 1})$$

onde:

λ = índice de esbeltez ao cisalhamento;

M = momento fletor na seção analisada;

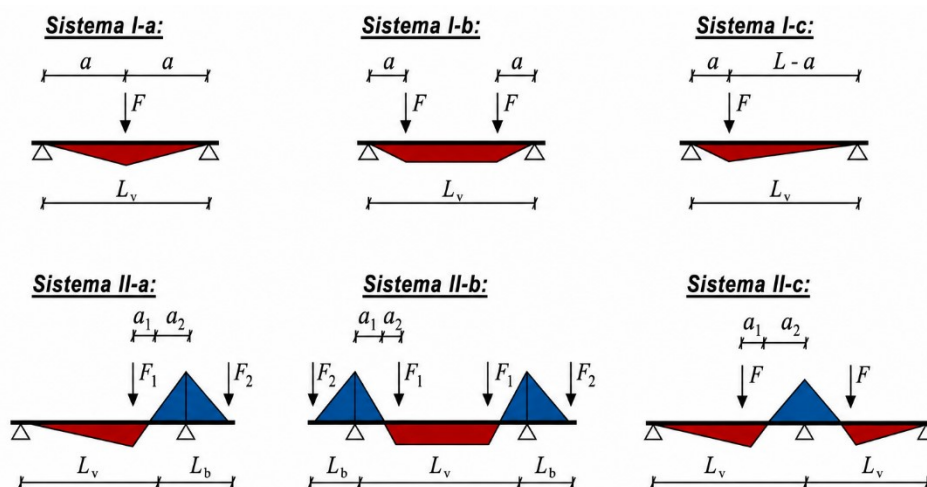
V = esforço cortante atuante;

d = altura útil da seção.

A Figura 5 apresenta diferentes configurações de apoio e carregamento empregadas em vigas. Nos sistemas do tipo I, o vão de cisalhamento encontra-se claramente definido, permitindo simplificar o índice de esbeltez para a relação a/d , em que a corresponde ao vão de cisalhamento. Para vigas contínuas (sistemas do tipo II), entretanto, a determinação desse parâmetro torna-se mais complexa devido à presença de regiões de momentos positivos e negativos, sendo necessária a divisão do vão de cisalhamento em dois segmentos, conforme proposto por Adam *et*

al. (2022).

Figura 5 – Tipos de carregamento para definição do vão de cisalhamento.



Fonte: Adaptado de Adam et al., (2022)

Onde:

- $L_v \rightarrow$ comprimento do vão principal entre os apoios.
- L_b - comprimento do balanço à direita do apoio central

Para essas situações, Adam et al. (2022) recomendam que o índice de esbeltez seja determinado considerando o maior vão de cisalhamento atuante, conforme a Equação 2.

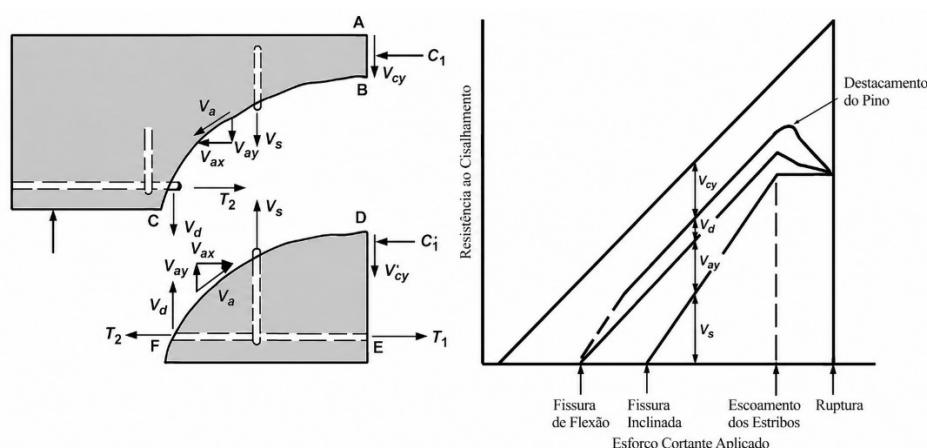
$$\lambda = \frac{M}{Vd} = \frac{\max(a_1; a_2)}{d} \quad (\text{Equação 2})$$

Dessa forma, verifica-se que a configuração do carregamento e das condições de apoio pode modificar o índice de esbeltez ao cisalhamento e, consequentemente, influenciar a capacidade resistente da estrutura. Em vigas contínuas, a redistribuição dos esforços entre as regiões de momento positivo e negativo tende a reduzir esse índice em determinadas situações, favorecendo o comportamento resistente ao cisalhamento quando comparado ao de vigas simplesmente apoiadas submetidas a condições equivalentes.

Além das condições de apoio e carregamento, a presença de armadura transversal exerce papel fundamental na resistência ao cisalhamento de vigas de concreto armado. Hu, B.; Wu, Y. (2018) afirmam que, após o surgimento das fissuras

inclinadas, a resistência ao cisalhamento passa a resultar da contribuição conjunta do concreto e da armadura transversal. Enquanto o concreto perde gradativamente sua capacidade de transferir esforços devido ao avanço da fissuração, a armadura transversal passa a atuar como elemento tracionado do modelo resistente em treliça, controlando a abertura das fissuras e contribuindo para o aumento da capacidade resistente e da ductilidade da estrutura (Wight; Macgregor, 2012; Marí, 2024). Essa redistribuição dos esforços internos é um dos principais fatores responsáveis pelo comportamento mais seguro de vigas providas de armadura transversal quando comparadas às vigas sem esse tipo de reforço (Hu, B.; Wu, Y. (2018); Muttoni; Fernández Ruiz, 2008).

Figura 6 - Comportamento de uma viga com armadura transversal.

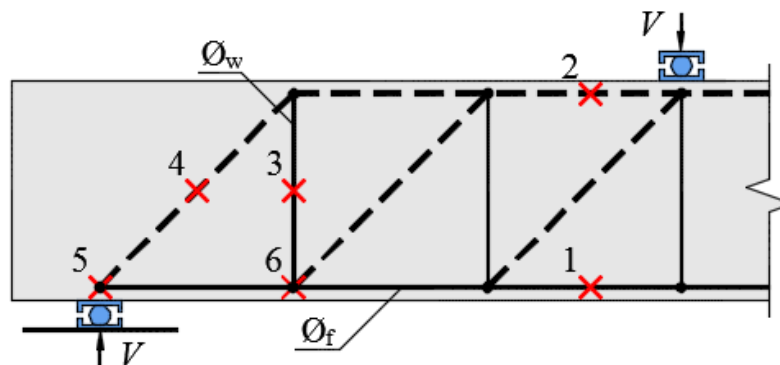


Fonte: Adaptado de Wight e Macgregor (2012)

No dimensionamento de vigas com armadura transversal, devem ser verificadas tanto as condições relacionadas à flexão quanto aquelas associadas ao cisalhamento (Wight; Macgregor, 2012). Em relação à flexão, verificam-se o escoamento da armadura longitudinal e o esmagamento da zona comprimida do concreto (NBR 6118:2026). Quanto ao cisalhamento, destacam-se dois modos principais de ruptura: o escoamento da armadura transversal por tração diagonal e o esmagamento das bielas comprimidas de concreto (Wight; Macgregor, 2012). O primeiro ocorre quando a armadura transversal atinge sua capacidade resistente antes do concreto, enquanto o segundo está associado ao colapso das bielas comprimidas responsáveis pela transmissão das tensões internas (EUROCODE 2, 2023; ACI 318, 2025). Esses mecanismos constituem a base dos modelos

normativos de dimensionamento atualmente empregados (NBR 6118:2026; EUROCODE 2, 2023; ACI 318, 2025).

Figura 7 – Verificação quanto aos estados limites em vigas com armadura transversal.



Fonte: Tapajós, (2017).

Onde:

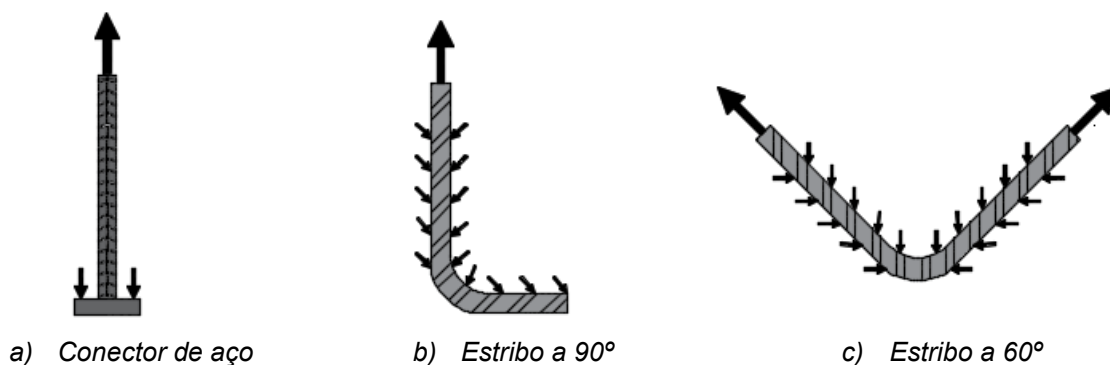
- 1 – Escoamento da armadura de flexão
- 2 – Esmagamento do concreto na zona comprimida
- 3 - Escoamento da armadura de cisalhamento
- 4 – Esmagamento da biela inclinada
- 5 – Falha de ancoragem da armadura de flexão
- 6 – Falha de ancoragem da armadura de cisalhamento

Outro ponto determinante para o desempenho da armadura transversal é a eficiência de sua ancoragem. Regan (2000) destaca que a máxima tensão desenvolvida na armadura depende diretamente da capacidade de transferência de esforços entre o aço e o concreto. Diferentemente de uma barra submetida à tração direta, os estribos encontram-se limitados pela resistência de aderência e pelos mecanismos de ancoragem presentes em suas extremidades (ACI 421.1R-08, 2008). Quando a ancoragem é insuficiente, podem ocorrer escorregamento das barras, arrancamento da armadura e desenvolvimento de fissuras horizontais de delaminação, reduzindo significativamente a contribuição da armadura transversal para a resistência ao cisalhamento (Regan, 2000; Beutel; Hegger, 2002; Tapajós, 2017).

Nos estribos convencionais, a ancoragem é garantida principalmente pela aderência entre o aço e o concreto e pelas dobras executadas nas extremidades das

barras (ACI 421.1R-08, 2008). A presença das barras longitudinais também contribui para a transferência das tensões desenvolvidas durante o carregamento, aumentando a eficiência do sistema de ancoragem (Regan, 2000). Em sistemas alternativos, como os estribos treliçados pré-fabricados, a eficiência da ancoragem torna-se ainda mais relevante, pois influencia diretamente a mobilização da armadura transversal e o desenvolvimento de fissuras de delaminação (Ferreira *et al.*, 2016; Tapajós, 2017). Em razão disso, diferentes configurações de armaduras e dispositivos suplementares de ancoragem têm sido investigados com o objetivo de aumentar a resistência ao cisalhamento e melhorar o desempenho estrutural desses sistemas (Pinto *et al.*, 2022; Souza *et al.*, 2023).

Figura 8 – Ancoragem das armaduras transversais.



Fonte: Tapajós, (2017)

Dessa forma, verifica-se que o comportamento ao cisalhamento de vigas de concreto armado é influenciado simultaneamente pelas condições de apoio e carregamento, pela geometria do elemento, pela presença da armadura transversal e pela eficiência de sua ancoragem (Adam *et al.*, 2022; Marí, 2024). A compreensão desses fatores é essencial para interpretar os resultados experimentais apresentados na literatura e para avaliar o desempenho de sistemas alternativos de armadura transversal, como os estribos treliçados pré-fabricados (Ferreira *et al.*, 2016; Tapajós, 2017; Pinto *et al.*, 2022).

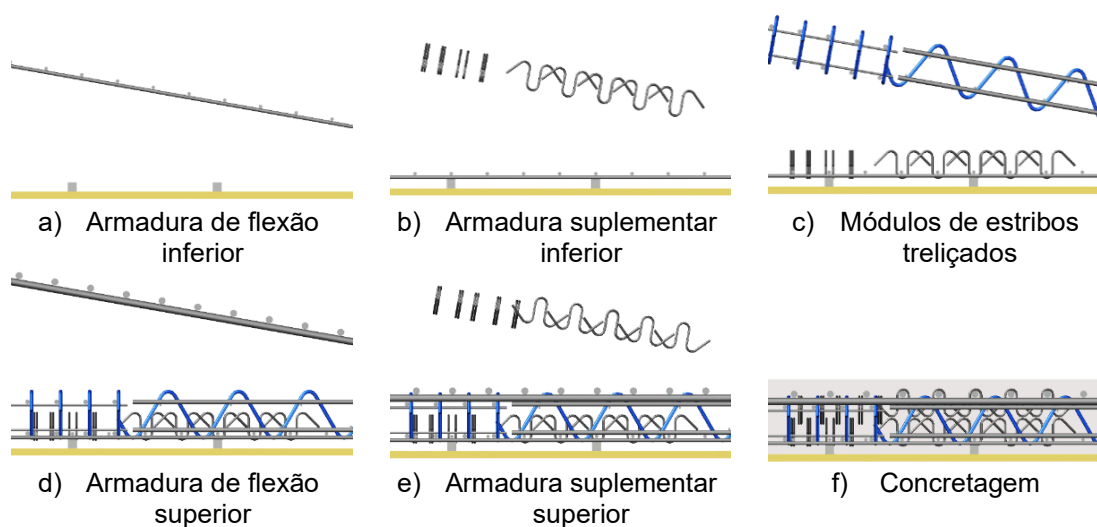
3. ESTRIBOS TRELIÇADOS PRÉ-FABRICADOS

Os estribos treliçados pré-fabricados foram desenvolvidos como uma alternativa às armaduras transversais convencionais, buscando solucionar dificuldades executivas relacionadas ao elevado congestionamento de armaduras

em regiões submetidas a altos esforços cortantes. Além de facilitar a montagem das armaduras, o sistema foi concebido para aumentar a produtividade da execução, reduzir incompatibilidades entre as armaduras de flexão e cisalhamento e possibilitar a industrialização do processo construtivo (Ferreira et al., 2016).

O sistema é constituído por módulos treliçados posicionados entre as armaduras longitudinais inferior e superior, permitindo maior facilidade de montagem quando comparado aos estribos convencionais. As barras horizontais soldadas aos módulos também contribuem para a estabilidade da armadura durante a montagem e favorecem a eficiência da ancoragem (Ferreira et al., 2016).

Figura 9 – Procedimento de montagem dos estribos treliçados pré-fabricados.



Fonte: Ferreira et al., 2021.

Os primeiros ensaios experimentais foram realizados por Ferreira et al. (2016), que avaliaram a utilização dos estribos treliçados como armadura de cisalhamento em vigas faixa de concreto armado. Os resultados mostraram que as vigas armadas com esse sistema apresentaram aumento de até 82% na resistência ao cisalhamento quando comparadas às vigas sem armadura transversal. Entretanto, observou-se redução da eficiência do sistema em vigas mais esbeltas, comportamento atribuído ao desenvolvimento de fissuras de delaminação, que limitaram a mobilização da armadura transversal.

Tabela 1 - Características das vigas ensaiadas por Ferreira et al. (2016).

Série	Viga	h (mm)	d (mm)	a (mm)	a/d	f_c (MPa)	ρ_l (%)	ρ_w (%)	α (°)
1 ^a	R-2	190	158	325	2,1	40	1,71	-	-
1 ^a	C-2-90	190	161	325	2,0	40	1,68	0,185	90
1 ^o	W-2-90a	190	162	325	2,0	40	1,67	0,149	90
2 ^a	W-2-90b	210	182	400	2,2	33	2,42	0,149	90
2 ^a	R-4	210	176	670	3,8	33	2,50	-	-
2 ^a	C-4-90	210	178	670	3,8	33	2,47	0,139	90
2 ^a	W-4-90	210	182	670	3,7	33	2,42	0,111	90
2 ^a	W-4-45	210	182	670	3,7	33	2,42	0,111	45

Com o objetivo de melhorar a ancoragem dos estribos treliçados, Tapajós (2017) desenvolveu um programa experimental composto por ensaios de push-off e ensaios em vigas faixa. Os resultados mostraram que a utilização de armaduras suplementares em formato de gancho proporcionou desempenho semelhante ao dos estribos convencionais e dos stud rails, reduzindo os efeitos da delaminação e aumentando a mobilização da armadura transversal. Nos ensaios em vigas, as armaduras suplementares proporcionaram aumento da capacidade resistente e melhor desempenho estrutural quando comparadas aos estribos treliçados sem reforço de ancoragem.

Tabela 2 - Características dos espécimes de push-off ensaiados por Tapajós (2017).

Espécime	Φ_w (mm)	n_w	A_{sw} (mm ²)	s (mm)	f_{yw} (MPa)	Tipo
C	5.0	8	157.1	100	676	Estribo Convencional
S	8.0	3	150.8	125	610	Stud
W	5.0	8	157.1	100	676	Estribo W
Wc	5.0	8	157.1	100	610	Estribo W + armadura suplementar
Obs.: $f_c = 23,5$ MPa; $h_{ef} = 60$ mm						

Tabela 3 - Características das vigas ensaiadas por Tapajós (2017).

Série	Viga	a/d	d (mm)	ρ_l (%)	ρ_w (%)	Tipo de armadura de cisalhamento
1 ^a /2 ^a	R-3.5	3,54	175	2,51	-	-
1 ^a	C-3.5-0.16	3,56	174	2,48	0,16	Estribo fechado
	S-3.5-0.16	3,44	180	2,44	0,16	Stud
	W-3.5-0.17	3,48	178	2,45	0,17	Estribo W
	Wc-3.5-0.17	3,58	173	2,54	0,17	Estribo W + armadura suplementar
2 ^a	C-3.5-0.24	3,48	178	2,47	0,24	Estribo fechado
	S-3.5-0.24	3,44	180	2,44	0,24	Stud
	W-3.5-0.25	3,54	175	2,51	0,25	Estribo W
	Wc-3.5-0.25	3,54	175	2,51	0,25	Estribo W + armadura suplementar

Obs.: $b_w = 500\text{mm}$; $h = 210\text{mm}$; $A_s = 2198\text{mm}^2$; $f_c = 23,5\text{ MPa}$; $f_{ys} = 558\text{ MPa}$; $\rho_w = \frac{A_{sw}}{b_w s}$; $\rho_l = \frac{A_s}{b_w d}$; $\alpha = 90^\circ$; $a = 620\text{ mm}$; $\varphi_f = 20\text{ mm}$; $\varphi_f' = 6,3\text{ mm}$; $L = 2000\text{ mm}$.

Posteriormente, Pinto et al. (2022) avaliaram a influência da inclinação das barras e da posição das armaduras suplementares no comportamento de vigas armadas com estribos treliçados pré-fabricados. Os resultados evidenciaram que a configuração da armadura suplementar influencia diretamente a resistência ao cisalhamento e a deformação da armadura transversal, confirmando a importância da eficiência da ancoragem para o desempenho do sistema.

Tabela 4 – Resultados dos ensaios de Souza et al. (2023).

Viga	Φ_w (mm)	α (°)	No Φ_w	A_{sw} (mm ²)	S (mm)	ρ_w (%)	f_{ys} (MPa)
C-4-90	6,3	90	4	113,10	100	0,23	687,12
M-8-90	4,2	90	8	110,84		0,22	612,56
M-4-90	6,3	90	4	113,10		0,23	687,12
M-8-60	4,2	60	8	110,84		0,26	612,56
M-4-60	6,3	60	4	113,10		0,26	687,12
Bw (mm)	h (mm)	a (mm)	d (mm)	L (mm)	Φ_f '(mm)	f_c (MPa)	f_{ys} (MPa)
500	210	620	171,5	2300	8	25	531,95

Na sequência, Ferreira et al. (2021) ampliaram a aplicação dos estribos treliçados para lajes lisas submetidas à punção, enquanto Souza et al. (2023) investigaram o comportamento do sistema em vigas de concreto armado. Os resultados dessas pesquisas confirmaram a viabilidade do sistema e demonstraram que melhorias na ancoragem favorecem a distribuição de tensões, reduzem a delaminação e aumentam a eficiência da armadura transversal.

De forma geral, os estudos desenvolvidos demonstram uma evolução contínua dos estribos treliçados pré-fabricados, desde a comprovação de sua viabilidade estrutural até o aperfeiçoamento dos mecanismos de ancoragem e sua aplicação em diferentes elementos de concreto armado. Apesar dos resultados promissores, observa-se que a maioria das pesquisas foi realizada em vigas simplesmente apoiadas, permanecendo limitada a investigação do comportamento desse sistema em vigas contínuas submetidas ao cisalhamento. Essa lacuna constitui a principal motivação para o desenvolvimento da presente pesquisa.

4. RECOMENDAÇÕES NORMATIVAS

O dimensionamento de elementos de concreto armado submetidos ao cisalhamento é fundamentado em modelos mecânicos que procuram representar a interação entre o concreto e a armadura transversal na transferência dos esforços internos. Embora existam diferenças entre as recomendações internacionais, a ABNT NBR 6118:2026, o Eurocode 2 (2023) e o ACI 318 (2025) adotam modelos baseados na analogia da treliça, considerando que a resistência ao cisalhamento é resultante da contribuição conjunta do concreto e da armadura transversal. Esses modelos foram desenvolvidos a partir de resultados experimentais e aperfeiçoados ao longo das últimas décadas, constituindo atualmente a base para o dimensionamento de vigas de concreto armado submetidas ao cisalhamento.

Os cálculos normativos foram realizados utilizando as propriedades geométricas das vigas e as propriedades mecânicas dos materiais obtidas na etapa de caracterização experimental. Os parâmetros empregados em todos os modelos são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Parâmetros das vigas.

Parâmetro	Símbolo	VR	VW	VW+	Unidade
Comprimento total	L	2.500	2.500	2.500	mm
Largura da seção	bw	500	500	500	mm
Altura total	h	220	220	220	mm
Altura útil	d	175	175	180	mm
Área da armadura longitudinal por face	As	2.945	2.945	2.945	mm ²
Taxa de armadura longitudinal	ρl	3,27	3,27	3,27	%
Resistência média à compressão do concreto	fc	30,42	30,42	30,42	MPa
Resistência média à tração do concreto	fct	2,44	2,44	2,44	MPa
Módulo de elasticidade do concreto	Ec	18,86	18,86	18,86	GPa
Área efetiva da armadura transversal	Asw	—	112	112	mm ²
Espaçamento entre camadas	s	—	60	60	mm
Taxa de armadura transversal	ρw	—	0,37	0,37	%
Número equivalente de ramos verticais	Nφw	—	5,62	5,62	—
Diâmetro das barras dos estribos	φw	—	5	5	mm
Inclinação dos ramos da treliça	α	—	65	65	graus
Resistência ao escoamento dos estribos	fyw	—	616	616	MPa
Armadura suplementar	—	Não	Não	Duas faces	—

4.1 ABNT NBR 6118:2026

A ABNT NBR 6118:2026 apresenta dois modelos para estimativa da resistência ao cisalhamento de vigas armadas transversalmente, denominados Modelo I e Modelo II. No Modelo I, a resistência ao cisalhamento de vigas com armadura transversal ($V_{R,cs I}$) é obtida pela soma da contribuição do concreto ($V_{R,c I}$) com a contribuição da armadura transversal ($V_{R,s I}$) conforme apresentado na Equação 3. Nesse modelo, admite-se que as bielas comprimidas possuem inclinação fixa de 45°. A contribuição do concreto é determinada pela Equação 4, que representa a resistência ao cisalhamento de vigas sem armadura transversal, considerando a resistência à tração do concreto. A contribuição da armadura transversal é calculada por meio da Equação 5, enquanto a resistência máxima da seção ($V_{R,max I}$) é limitada pela Equação 6, correspondente à verificação do esmagamento das bielas comprimidas.

$$V_{R,cs I} = V_{R,c I} + V_{R,s I} \text{ (Equação 3)}$$

$$V_{R,c I} = 0.6 f_{ctk,inf} b_w d \text{ (Equação 4)}$$

$$V_{R,s I} = \frac{A_{sw}}{s} 0.9 d f_{yw} (\sin \alpha + \cos \alpha) \text{ (Equação 5)}$$

$$V_{R,max I} = 0.27 \left(1 - \frac{f_c}{250}\right) f_c b_w d (\cot \alpha + 1) \text{ (Equação 6)}$$

Onde:

b_w é a largura da viga;

d é a altura útil da viga;

s é o espaçamento entre as camadas de armadura transversal;

A_{sw} é a área de aço de uma camada de armadura transversal;

f_{yw} é a tensão de escoamento da armadura transversal, limitada a 500 MPa;

α é o ângulo de inclinação da armadura transversal em relação à longitudinal;

$f_{ctk,inf} = 0.7 f_{ct,m}$, equivalente à resistência à tração frágil do concreto em 5% dos casos;

f_c é a resistência à compressão do concreto, obtida pelos ensaios em corpos de prova cilíndricos;

$f_{ct,m}$ é a resistência média à tração do concreto, calculada por: $f_{ct,m} = 0.3f_c^{2/3}$, para concretos com resistência à compressão de até 50 Mpa;

Assim como o Modelo I, o Modelo II da ABNT NBR 6118:2026 determina que a resistência ao cisalhamento de vigas com armadura transversal ($V_{R,cs II}$) corresponde à soma das contribuições do concreto ($V_{R,c II}$) e da armadura transversal ($V_{R,s II}$), conforme apresentado na Equação 7. Entretanto, esse modelo incorpora a influência da fissuração diagonal sobre o comportamento resistente da viga, admitindo que a inclinação das bielas comprimidas possa variar entre 30° e 45°. Em razão dessa consideração, a contribuição do concreto é obtida pela Equação 8 e passa a depender do esforço cortante atuante (V), sendo necessária uma solução iterativa para sua determinação. A parcela resistente fornecida pela armadura transversal é calculada pela Equação 9, enquanto a resistência máxima da seção ($V_{R,max II}$) é verificada por meio da Equação 10, que corresponde ao limite de resistência das bielas comprimidas.

$$V_{R,cs II} = V_{R,c II} + V_{R,s II} \text{ (Equação 7)}$$

$$V_{R,c II} = V_{R,c I} \frac{V_{R,max II} - V}{V_{R,max II} - V_{R,c I}} \leq V_{R,c II} \text{ (Equação 8)}$$

$$V_{R,s II} = \frac{A_{sw}}{s} 0.9d f_{yw} (\sin \alpha + \cos \alpha) \sin \alpha \text{ (Equação 9)}$$

$$V_{R,max II} = 0.54 \left(1 - \frac{f_c}{250} \right) f_c b_w d \sin^2 \theta (\cot \alpha + \cot \theta) \text{ (Equação 10)}$$

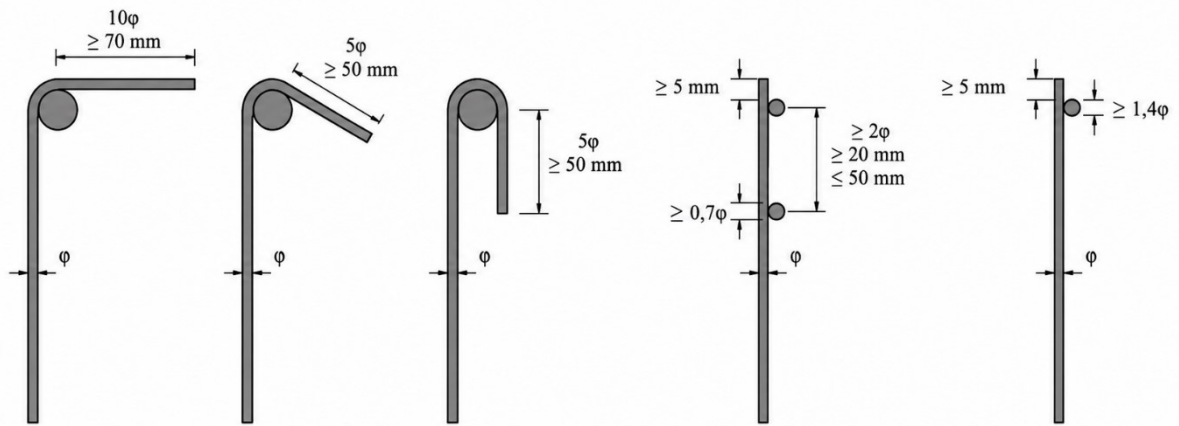
Onde:

θ é o ângulo de inclinação da biela, podendo variar entre 30° e 45° para o modelo II.

No Item 9.4.6, a ABNT NBR 6118:2026 recomenda que a ancoragem dos estribos seja realizada por meio de ganchos envolvendo as armaduras longitudinais

ou por barras soldadas, conforme apresentado na Figura 10. A Figura x mostra que, para estribos que não envolvem as armaduras de flexão, a ABNT NBR 6118:2026 recomenda a utilização de barras soldadas para a ancoragem, desde que a resistência da solda seja superior à tensão de escoamento da armadura transversal. Dessa forma, os estribos treliçados pré-fabricados atendem a essa exigência normativa por utilizarem barras soldadas em suas extremidades.

Figura 10 – Modelo resistente adotado pela ABNT NBR 6118:2026.



Fonte: ABNT NBR 6118:2026

4.2 EUROCODE 2 (2023)

O Eurocode 2 (2023) utiliza a Equação 11 para determinar a resistência ao cisalhamento de vigas sem armadura transversal ($V_{R,c}$). Em relação à versão anterior, a norma passou a considerar o diâmetro máximo do agregado graúdo na avaliação do efeito de escala. Além disso, a taxa de armadura longitudinal permanece sendo considerada devido ao efeito pino, porém sem a limitação de 2% adotada nas versões anteriores.

$$V_{R,c} = \max \left\{ \frac{0.66 \left(100 \rho_l f_c \frac{d_{ag}}{d} \right)^{\frac{1}{3}}}{11 \left(\sqrt{\frac{f_c d_{ag}}{f_{ys} d}} \right)} b_w 0.9 d \right\} \quad (\text{Equação 11})$$

Onde: ρ_l é a parcela referente à taxa de armadura longitudinal, calculada por $\rho_l = A_s / bwd$

A_s é a área de aço da armadura de flexão da viga;

ddg é um parâmetro de escala que depende do tipo de concreto e das propriedades do agregado graúdo, sendo calculado, para concretos com f_c de até 60 MPa, pela soma do diâmetro máximo do agregado graúdo com 16, não podendo ultrapassar o valor de 40 mm;

f_{ys} é a tensão de escoamento da armadura longitudinal.

Em comparação com a edição de 2004, o Eurocode 2 (2023) também alterou a forma de considerar a altura útil da viga (d) na Equação 11. Quando o vão efetivo de cisalhamento (a_{cs}), obtido pela Equação 12, for inferior a quatro vezes a altura útil da seção, o valor de ddd deve ser substituído pelo vão mecânico de cisalhamento (a_v), determinado pela Equação 13.

$$a_{cs} = \left[\frac{M}{V} \right] \geq d \quad (\text{Equação 12})$$

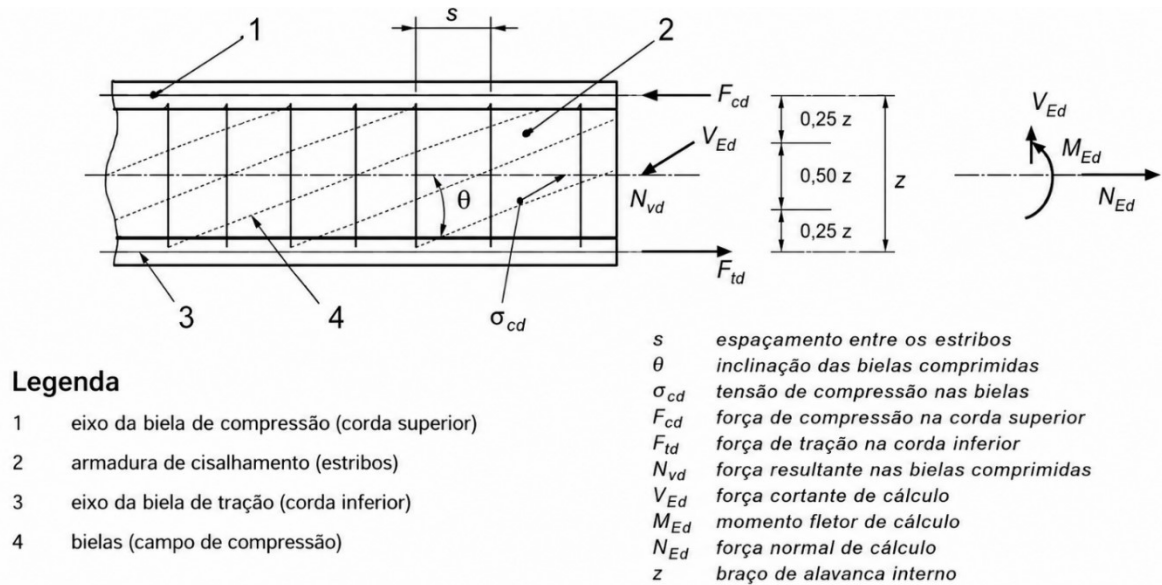
$$a_v = \sqrt{\frac{a_{cs}}{4}} d \quad (\text{Equação 13})$$

Onde: M e V são, respectivamente, o momento e o cortante atuante na seção transversal analisada.

O Eurocode 2 (2023) determina que a resistência ao cisalhamento de elementos com armadura transversal ($V_{R,cs}$) seja calculada pela Equação 14, considerando a contribuição da armadura em função do ângulo da tensão principal de cisalhamento, conforme ilustrado na Figura 11.

$$V_{R,cs} = \frac{A_{sw} f_{yw} 0.9d}{s} \quad (\text{Equação 14})$$

Figura 11 – Modelo resistente.



Fonte: Eurocode 2 (2023)

O valor de $V_{R,cs}$ deve ser maior ou igual à resistência ao cisalhamento de vigas sem armadura transversal ($V_{R,c}$), e não pode ultrapassar a resistência máxima da seção ($V_{R,max}$) calculado pela Equação 15, que representa o limite de esmagamento das bielas comprimidas. Além disso, o Eurocode 2 (2023) estabelece que o valor de $\cot\theta$ deve permanecer entre 1,0 e 2,5, correspondendo a ângulos da biela comprimida entre 45° e $21,8^\circ$ respectivamente, sendo esse parâmetro calculado pela Equação 16.

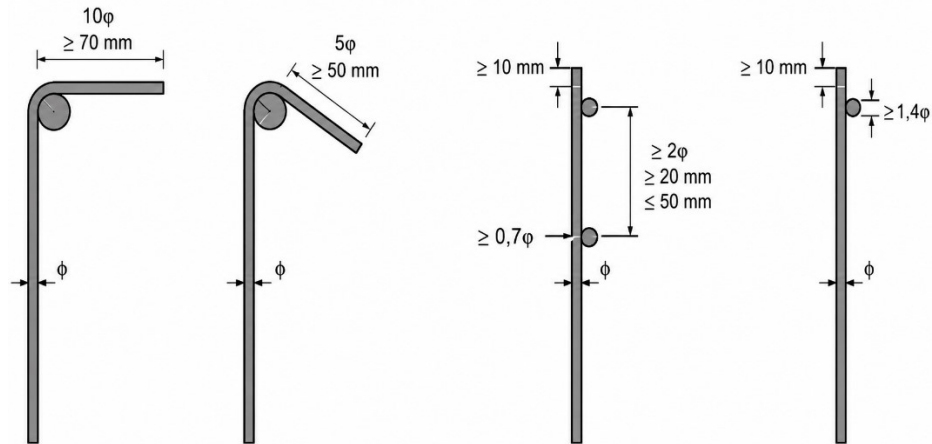
$$V_{R,max} = \frac{f_c}{4} \text{ (Equação 15)}$$

$$\cot \theta = \sqrt{\frac{0.5f_c}{p_w f_{yw}}} - 1 \text{ (Equação 16)}$$

Onde: p_w é a taxa de armadura transversal, calculada por $p_w = \frac{A_{sw}}{b_w s}$

De acordo com o Eurocode 2 (2023), a ancoragem dos estribos deve ser realizada, preferencialmente, envolvendo as armaduras longitudinais de flexão. Como alternativa, a norma admite o emprego de barras longitudinais soldadas aos estribos, desde que sejam respeitadas as exigências apresentadas na Figura 12.

Figura 12 – Recomendações para ancoragem de estribos.



Fonte: Adaptado do Eurocode 2, 2023.

4.3 ACI 318 (2025)

O ACI 318 (2025) apresenta duas expressões para o cálculo da resistência ao cisalhamento de elementos de concreto armado sem armadura transversal, conforme as Equações 17 e 18, cabendo ao projetista definir qual delas será adotada. A norma também dispõe de uma equação que incorpora o efeito de escala para vigas que não atendem à taxa mínima de armadura transversal. Entretanto, essa abordagem não será considerada no presente estudo.

$$V_{R,c} = 0.17\sqrt{f_c}b_wd \text{ (Equação 17)}$$

$$V_{R,c} = 0.66(p_l)^{1/3}\sqrt{f_c}b_wd \text{ (Equação 18)}$$

Para vigas com armadura transversal, o ACI 318 (2025) estabelece que a resistência ao cisalhamento ($V_{R,cs}$) seja obtida pela soma das contribuições do concreto e da armadura transversal, conforme a Equação 19. Nesse modelo, considera-se que as bielas comprimidas possuem inclinação de 45°. A contribuição da armadura transversal ($V_{R,s}$) é determinada pela Equação 20, sendo a tensão de escoamento da armadura limitada a 420 MPa. Além disso, a resistência máxima da seção ($V_{R,max}$) é verificada pela Equação 21, correspondente ao limite de esmagamento das bielas comprimidas.

$$V_{R,cs} = V_{R,c} + V_{R,s} \text{ (Equação 19)}$$

$$V_{R,s} = \frac{A_{sw}f_{yw}d}{s} \text{ (Equação 20)}$$

$$V_{R,max} = V_{R,c} + 0.66\sqrt{f_c}b_wd \text{ (Equação 21)}$$

Outro aspecto importante é que o ACI recomenda que os estribos envolvam obrigatoriamente as barras longitudinais de flexão, assegurando condições adequadas de ancoragem da armadura transversal. Essa exigência está diretamente relacionada aos estudos experimentais que demonstram a influência da ancoragem na mobilização dos estribos e na resistência ao cisalhamento das vigas.

4.4 DISCUSSÃO DOS PROCEDIMENTOS NORMATIVOS

Embora as três recomendações apresentem diferenças na formulação das equações e nos critérios de cálculo, observa-se que todas se fundamentam no conceito da treliça resistente e consideram a participação conjunta do concreto e da armadura transversal na resistência ao cisalhamento. As principais diferenças concentram-se na forma de estimar a contribuição do concreto, na inclinação adotada para as bielas comprimidas e nos limites estabelecidos para a resistência da armadura transversal e da seção de concreto.

Entretanto, nenhuma dessas recomendações apresenta procedimentos específicos para o dimensionamento de elementos armados com estribos treliçados pré-fabricados. Os modelos normativos foram desenvolvidos considerando predominantemente estribos convencionais e pressupõem condições adequadas de aderência e ancoragem da armadura transversal. Dessa forma, aspectos como a influência da geometria dos módulos treliçados, dos nós soldados e das armaduras suplementares não são contemplados explicitamente pelas normas.

Nesse contexto, os estudos experimentais desenvolvidos por Ferreira et al. (2016), Tapajós (2017), Pinto et al. (2022) e Souza et al. (2023) assumem papel fundamental, pois permitem avaliar a aplicabilidade dos modelos normativos a

sistemas alternativos de armadura transversal e identificar possíveis limitações das recomendações atuais. Essa comparação entre resultados experimentais e previsões teóricas constitui uma das principais etapas da presente pesquisa.

5. PROGRAMA EXPERIMENTAL

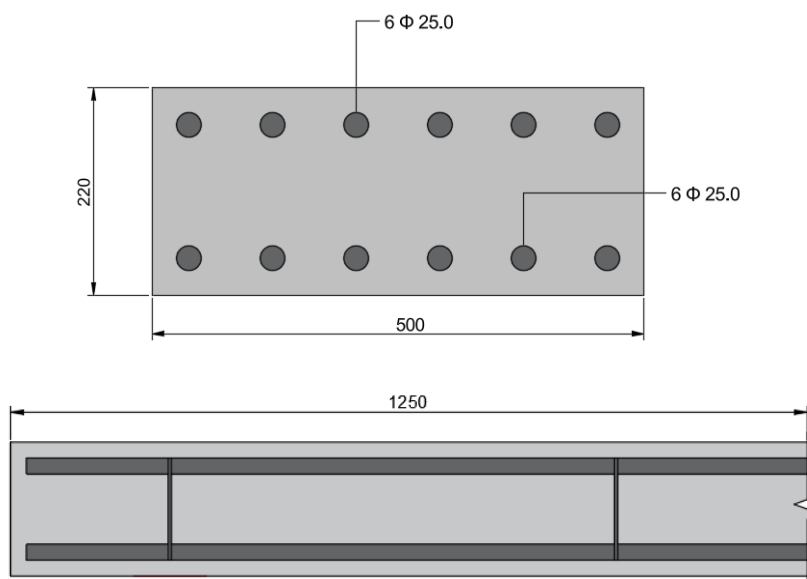
5.1 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental foi desenvolvido com o objetivo de avaliar o comportamento ao cisalhamento de vigas contínuas de concreto armado submetidas a diferentes configurações de armadura transversal. A campanha experimental foi composta por três modelos, concebidos para permitir a comparação entre uma solução convencional de armadura transversal e um sistema constituído por estribos treliçados pré-fabricados em formato W associados à armadura suplementar.

Foram ensaiadas três vigas, identificadas como VR, Vw e Vw+. A viga VR foi adotada como modelo de referência, utilizando armadura convencional, a viga VW foi executada com estribos treliçados pré-fabricados em formato W e a viga VW+ com estribos treliçados pré-fabricados em formato W associados à armadura suplementar. A comparação entre os modelos permitiu avaliar a influência da configuração da armadura transversal sobre o comportamento estrutural das vigas submetidas a esforços de cisalhamento. A Figura 1 apresenta uma vista geral dos modelos experimentais utilizados na campanha de ensaios.

Os modelos experimentais foram constituídos por vigas contínuas de concreto armado com seção transversal retangular, projetadas para reproduzir uma condição estrutural representativa de elementos contínuos submetidos predominantemente à ação de esforços cortantes. As vigas foram dimensionadas de forma a apresentar as mesmas características geométricas, permitindo que as diferenças observadas durante os ensaios estivessem relacionadas exclusivamente ao sistema de armadura transversal adotado. A Figura 13 apresenta a geometria geral dos modelos experimentais, incluindo as dimensões principais, a configuração estrutural da viga contínua e o detalhamento da armadura longitudinal.

Figura 13 – Geometria geral e detalhamento da armadura longitudinal das vigas.



Fonte: Autor

As principais características geométricas dos modelos experimentais são apresentadas na Tabela 6, incluindo as dimensões das vigas, a relação a/d , a altura útil e os parâmetros adotados no dimensionamento dos modelos.

Tabela 6 – Características geométricas dos modelos experimentais.

Viga	pw (%)	s (mm)	bw (mm)	Armadura Suplementar	d (mm)	λ	Asw (mm²)
VR	-	-	500	-	175	2,19	-
VW	0,37	60		-	175	2,19	112
VW+				Ambas as faces	180	2,13	
fc = 30Mpa; p = p' = 3,27%; fys = 500 Mpa; fyw = 600 Mpa; Φs / Φs'= 25mm; Φw = 5 mm; n Φs = 5,63.							

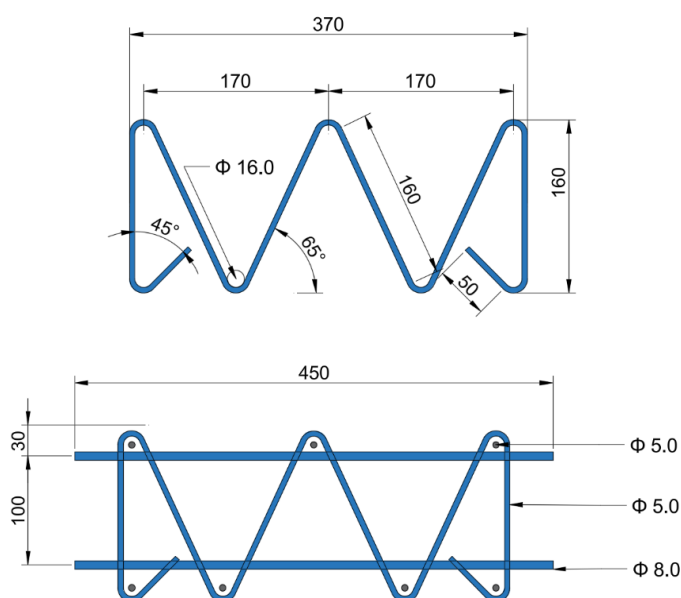
5.2 ARMADURA TRANSVERSAL

A armadura transversal adotada neste trabalho é constituída por estribos treliçados pré-fabricados, empregados em todas as vigas ensaiadas, com exceção da viga de referência (VR), que não possui armadura de cisalhamento. A utilização desse sistema teve como objetivo avaliar a influência dos estribos treliçados e das armaduras suplementares na resistência ao cisalhamento e no comportamento estrutural das vigas.

Os estribos treliçados pré-fabricados foram confeccionados com barras de

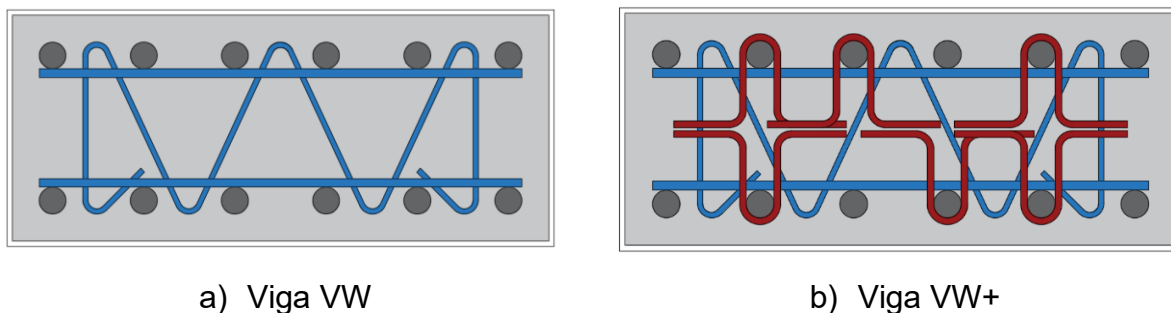
aço CA-60 de 5 mm de diâmetro. Cada estribo é composto por duas pernas verticais e quatro pernas inclinadas a 65° , configuração equivalente a 5,63 pernas verticais. Durante a fabricação, foram soldadas barras horizontais de aço CA-50 com 8 mm de diâmetro nas extremidades superior e inferior dos estribos, seguindo as recomendações da NBR 6118:2026. Essas barras auxiliam no posicionamento da armadura de flexão e facilitam a montagem da armadura das vigas. Além disso, barras de aço CA-60 com 5 mm de diâmetro foram posicionadas entre as dobras dos estribos, formando módulos que facilitam o transporte e a montagem do sistema.

Figura 14 – Estribo treliçado pré-fabricado.



O programa experimental desta pesquisa contempla três configurações de vigas. A viga VR foi utilizada como modelo de referência, sem armadura transversal. A viga VW foi armada com estribos treliçados pré-fabricados, sem armadura suplementar, enquanto a viga VW+ recebeu os mesmos estribos treliçados associados à armadura suplementar posicionada nas faces superior e inferior da seção, permitindo avaliar a influência desse reforço no desempenho da ancoragem e no comportamento ao cisalhamento.

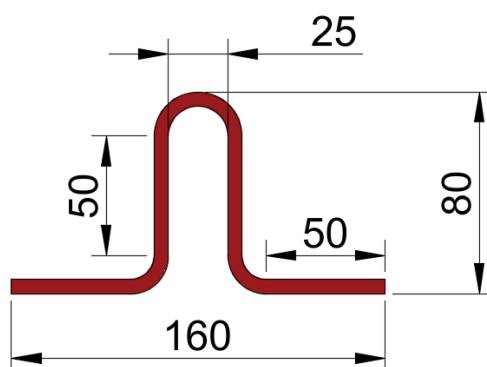
Figura 15 – Armadura de cisalhamento das vigas.



Fonte: Autor

Para reduzir os efeitos da delaminação, a viga VW+ foi equipada com armaduras suplementares semelhantes às utilizadas em pesquisas anteriores citadas pelo autor. Essas armaduras têm a finalidade de melhorar as condições de ancoragem dos estribos treliçados e reduzir a propagação de fissuras associadas à perda de aderência entre o concreto e a armadura transversal. As armaduras suplementares foram confeccionadas com barras de aço CA-60 de 6 mm de diâmetro.

Figura 16 – Armadura suplementar de combate à delaminação.



Fonte: Autor

5.3 MATERIAIS

Os modelos experimentais foram confeccionados com concreto e barras de aço destinadas às armaduras longitudinal, transversal e suplementar. Antes da realização dos ensaios das vigas, esses materiais foram caracterizados experimentalmente, permitindo a determinação das propriedades mecânicas utilizadas na análise e interpretação dos resultados.

5.3.1 CONCRETO

O concreto empregado na moldagem das vigas foi produzido para atender à resistência prevista em projeto. Durante a concretagem, foram moldados corpos de prova cilíndricos destinados à caracterização das propriedades mecânicas do material. Após o período de cura, os corpos de prova foram submetidos a ensaios de resistência à compressão axial e determinação do módulo de elasticidade, conforme os procedimentos estabelecidos pelas normas técnicas brasileiras aplicáveis.

Os valores médios obtidos para a resistência à compressão e para o módulo de elasticidade do concreto são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Propriedades mecânicas do concreto.

CP	f_c (MPa)	f_{ct} (MPa)	E_c (GPa)
1	29,53	2,61	17,11
2	30,76	2,83	25,87
3	30,83	2,31	19,17
4	30,21	2,01	18,05
5	29,37	2,22	14,75
6	31,81	2,66	18,22
Média	30,42	2,44	18,86
Desvio Padrão	0,91	0,31	3,75
COV	3%	13%	20%

Figura 17 – concretagem das vigas.



Fonte: Autor

5.3.2 AÇO

As armaduras longitudinal, transversal e suplementar foram confeccionadas com barras de aço de CA-50 e CA-60. A caracterização mecânica desse material foi realizada por meio de ensaios de tração, possibilitando a determinação do limite de escoamento, da resistência última à tração e do módulo de elasticidade das barras empregadas nos modelos experimentais.

Os resultados dos ensaios de caracterização do aço são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Propriedades do aço.

Aço	Φ (mm)	f_{ys} (MPa)	ϵ_{ys} (‰)	E_s (GPa)
CA-60 (estribos)	5.0	627	2,45	256
CA-60 (suplementar)	6.0	615	2,54	242
CA-50 (flexão)	25.0	556	2,80	199

5.4 INSTRUMENTAÇÃO DAS VIGAS

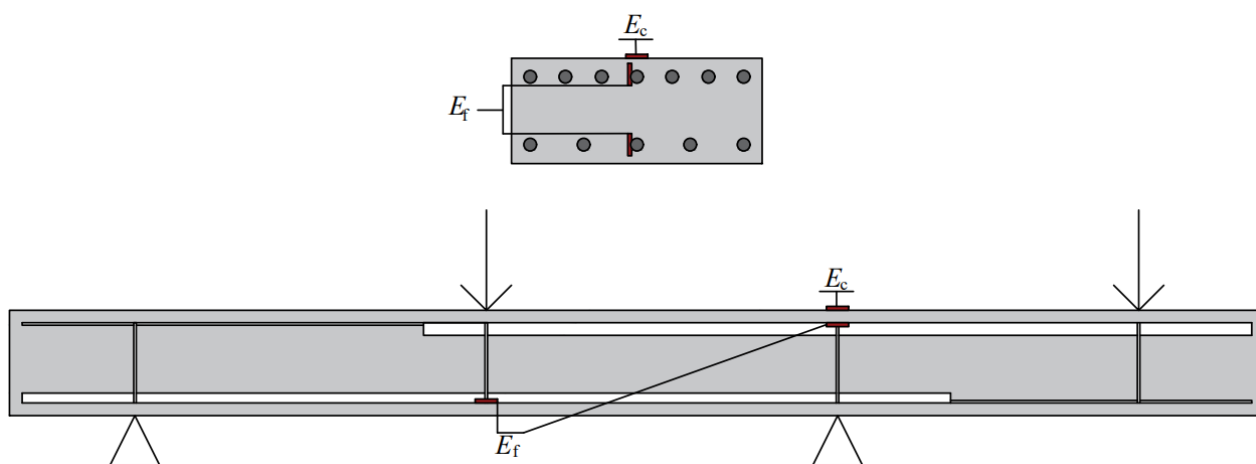
Os modelos experimentais foram instrumentados com o objetivo de monitorar o comportamento estrutural das vigas durante a aplicação do carregamento, possibilitando o registro das deformações nas armaduras e dos deslocamentos verticais ao longo do ensaio.

Para o monitoramento das deformações, foram instalados extensômetros elétricos de resistência em barras selecionadas das armaduras longitudinal e transversal, posicionados nas regiões de maior interesse para a análise do comportamento ao cisalhamento. A instrumentação permitiu acompanhar a evolução das deformações ao longo do carregamento, possibilitando a identificação da mobilização das armaduras e sua participação nos mecanismos resistentes.

Os deslocamentos verticais foram medidos por meio de transdutores de deslocamento (LVDTs), posicionados em pontos estratégicos das vigas para o registro das flechas durante os ensaios. Todos os instrumentos foram conectados a um sistema de aquisição de dados, permitindo o registro contínuo das leituras ao longo da aplicação do carregamento.

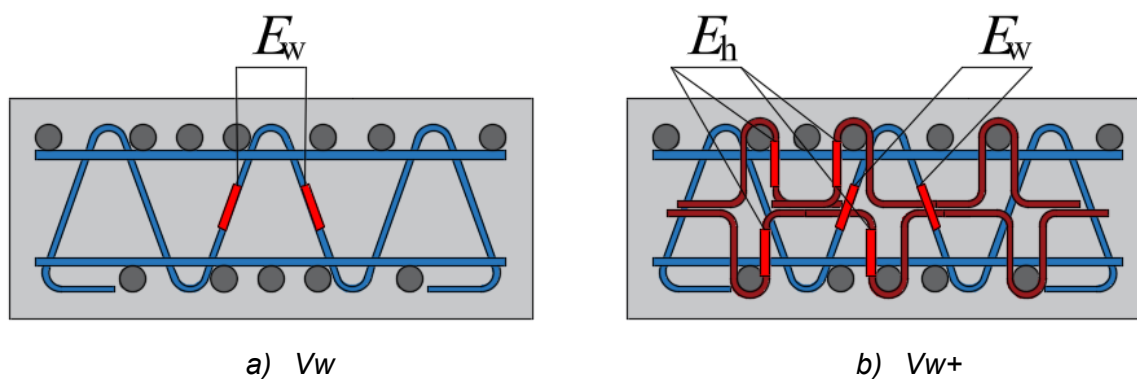
A Figura 18 apresenta o posicionamento dos extensômetros elétricos e dos transdutores de deslocamento utilizados na instrumentação dos modelos experimentais e a figura 19 apresenta a instrumentação da armadura transversal.

Figura 18 – Instrumentação das vigas experimentais.



Fonte: Autor

Figura 19 – Instrumentação da armadura transversal

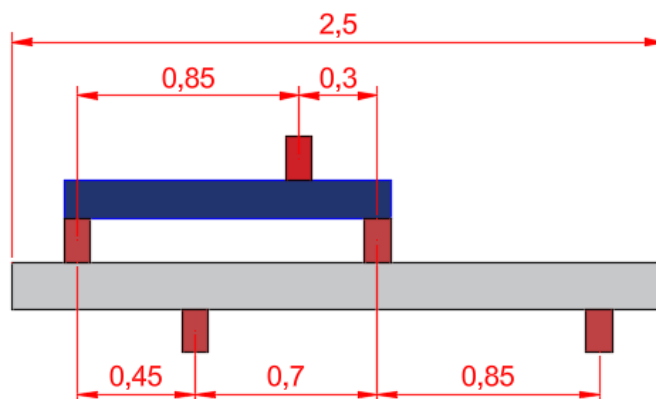


Fonte: Autor

5.5 SISTEMA DE ENSAIO

O sistema de ensaio foi concebido para reproduzir as condições de carregamento de uma viga contínua, possibilitando a avaliação do comportamento ao cisalhamento em regiões submetidas a momentos fletores positivos e negativos. O modelo experimental consistiu em uma viga contínua apoiada em dois pontos, com um trecho em balanço, submetida à aplicação de duas cargas concentradas, conforme apresentado na Figura 20.

Figura 20 – Sistema de ensaio adotado.



Fonte: Autor

Os ensaios foram realizados em um pórtico de reação, utilizando um macaco hidráulico com capacidade de 100 toneladas para aplicação do carregamento. A carga foi transmitida à viga por meio de perfis metálicos, permitindo sua distribuição nos dois pontos previstos no modelo experimental. A força aplicada foi monitorada continuamente por uma célula de carga acoplada ao sistema.

A viga foi apoiada sobre dois perfis metálicos, sendo um apoio de primeiro gênero (móvel) e outro de segundo gênero (fixo), reproduzindo as condições de vínculo estabelecidas para o modelo estrutural. A Figura 21 apresenta uma vista geral do sistema de ensaio montado no laboratório.

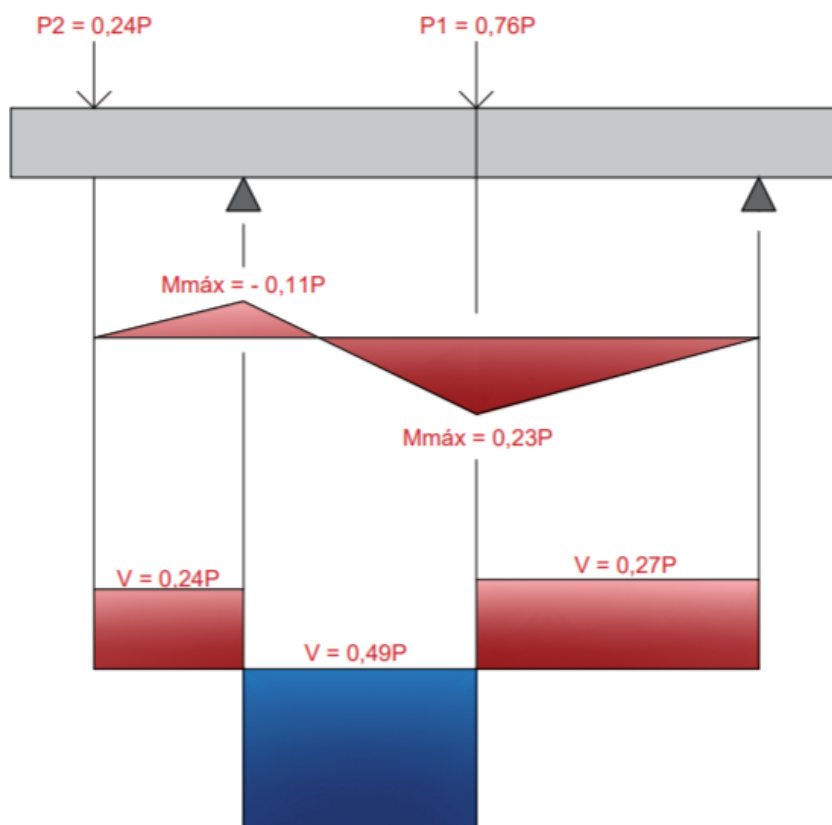
Figura 21 – Vista geral do sistema de ensaio.



Fonte: Autor

Os diagramas de momento fletor e esforço cortante correspondentes à configuração de carregamento adotada são apresentados na Figura 22, permitindo identificar as regiões críticas investigadas durante os ensaios.

Figura 22 – Sistema de carregamento, diagrama de momento fletor e diagrama de esforço cortante.



Fonte: Autor

5.6 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Após a montagem do sistema de ensaio e a instalação dos instrumentos de medição, as vigas foram posicionadas no pórtico de reação e submetidas à aplicação gradual de carregamento até a ruptura. Durante todo o ensaio, a força aplicada, os deslocamentos verticais e as deformações das armaduras foram registrados continuamente por meio do sistema de aquisição de dados.

O carregamento foi aplicado de forma progressiva por meio do macaco hidráulico, permitindo o acompanhamento da evolução do comportamento estrutural

dos modelos em cada etapa do ensaio. Simultaneamente, foi realizado o monitoramento do surgimento e da propagação das fissuras, com o objetivo de identificar sua localização, inclinação e evolução ao longo do carregamento.

Em intervalos previamente definidos de carregamento, foram registradas as leituras dos instrumentos de medição e realizado o mapeamento do quadro de fissuração das vigas. Esse procedimento permitiu correlacionar a evolução das deformações, dos deslocamentos e das fissuras com os diferentes níveis de carregamento aplicados durante o ensaio.

Os ensaios foram conduzidos até a ruptura de cada modelo, possibilitando a determinação da carga última, a identificação do modo de ruptura e a avaliação do comportamento estrutural das vigas ao longo de todo o processo de carregamento.

6. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

6.1 DESLOCAMENTO VERTICAL

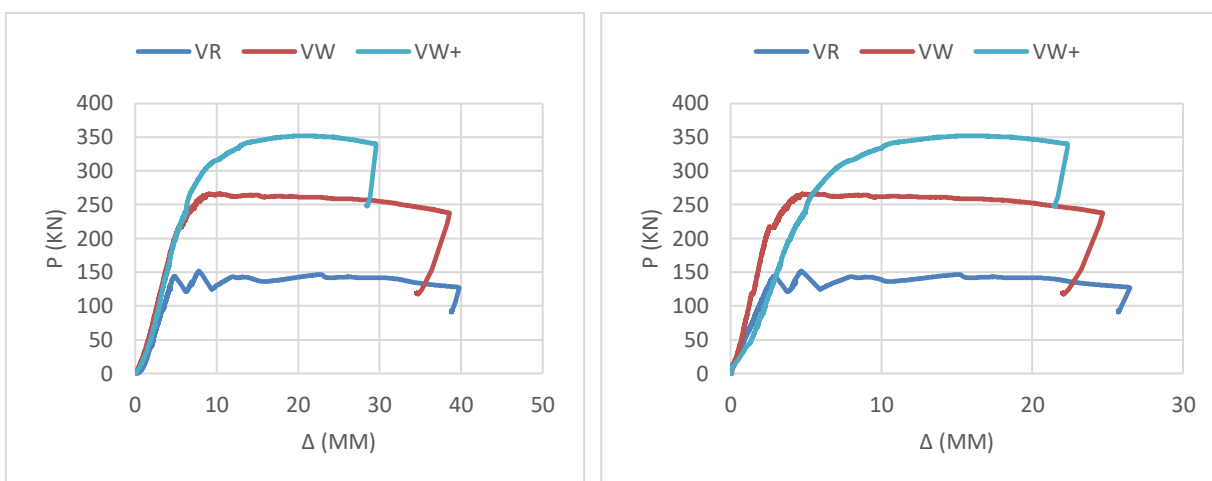
O acompanhamento da relação carga $\times$ deslocamento permitiu identificar a transição entre o comportamento elástico e os estágios de degradação da estrutura. Os deslocamentos foram monitorados por transdutores (LVDTs), de acordo com a figura 23, posicionados no centro dos vãos e sobre o apoio central, possibilitando a comparação entre a viga de referência (VR), sem armadura transversal, e as vigas VW e VW+, reforçadas com estribos treliçados pré-fabricados e diferentes configurações de armadura suplementar.

Figura 23 – Sistema de medição dos deslocamentos verticais



Fonte: Autor

Gráfico 1- Deslocamento vertical das vigas ensaiadas.



a) LVDT 1

b) LVDT 2

De acordo com o gráfico 1, na fase inicial do carregamento, correspondente ao Estádio I, as três vigas apresentaram comportamento elástico linear semelhante. Nessa etapa, a rigidez foi governada pela seção íntegra de concreto, não sendo observada influência significativa da armadura transversal, uma vez que as tensões de tração ainda não haviam provocado fissuração.

Com o aumento da carga, iniciou-se a transição para o Estádio II, caracterizada pela formação das primeiras fissuras e pela redução da rigidez da seção. A partir de aproximadamente 150 kN, observou-se a diferenciação entre os modelos: a viga VR passou a apresentar maiores deslocamentos para um mesmo nível de carregamento, enquanto as vigas VW e VW+ mantiveram maior rigidez devido à atuação dos estribos treliçados, que limitaram a abertura das fissuras e preservaram parte da capacidade resistente da seção.

No patamar de aproximadamente 250 kN, as diferenças tornaram-se mais evidentes. Na viga VR, a ausência de armadura transversal favoreceu o desenvolvimento de fissuras horizontais e o início da delaminação do cobrimento, ocasionando uma redução acentuada da rigidez. Em contrapartida, as vigas VW e VW+ apresentaram deslocamentos mais controlados, resultado da atuação conjunta dos estribos treliçados e das armaduras suplementares, que garantiram melhor ancoragem, reduziram a delaminação e preservaram a aderência entre aço e concreto.

Na região de momento positivo, situada no meio do vão, as vigas VW e VW+ apresentaram flechas inferiores às da viga VR, demonstrando maior eficiência na distribuição das tensões e na manutenção da rigidez da seção. Já na região de momento negativo, sobre o apoio central, a viga VW+ apresentou desempenho superior ao da VW devido à presença de armaduras suplementares nas faces superior e inferior, que proporcionaram melhor ancoragem das armaduras longitudinais e maior estabilidade frente às tensões de tração.

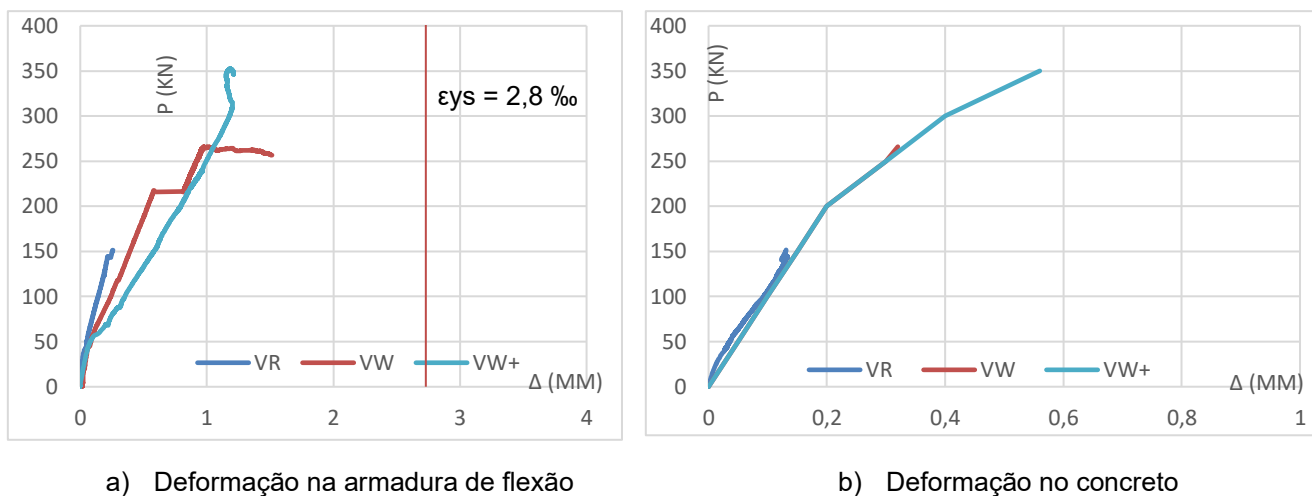
A evolução da rigidez ao longo do ensaio evidenciou que os estribos treliçados associados às armaduras suplementares proporcionaram uma degradação mais gradual da rigidez, permitindo que as vigas suportassem maiores incrementos de carga com deformações controladas. Esse comportamento contribuiu para reduzir o risco de falhas por perda de aderência e aumentar a capacidade resistente do sistema.

Também foi observado que as vigas VW e VW+ apresentaram maior ductilidade em comparação com a viga VR. Enquanto a viga de referência apresentou ruptura mais brusca, os modelos reforçados exibiram maior capacidade de deformação antes da ruptura, favorecendo a redistribuição dos esforços e proporcionando maior segurança estrutural.

Em síntese, os resultados demonstram que o emprego de estribos treliçados, aliado às armaduras suplementares, foi determinante para preservar a rigidez e controlar os deslocamentos das vigas após a fissuração. A superioridade das vigas VW e, principalmente, da VW+ tornou-se evidente após os níveis de carregamento de aproximadamente 150 kN e 250 kN, confirmando que a melhoria da ancoragem e o controle da delaminação aumentam a estabilidade, a ductilidade e o desempenho estrutural de vigas submetidas a elevados esforços cortantes.

O comportamento estrutural das vigas, foram monitoradas as deformações da armadura de flexão e do concreto comprimido na região de momento máximo positivo. O Gráfico 2 apresenta, respectivamente, as deformações registradas na armadura de flexão e no concreto ao longo do carregamento.

Gráfico 2 - Deformações na armadura de flexão e no concreto das vigas ensaiadas.

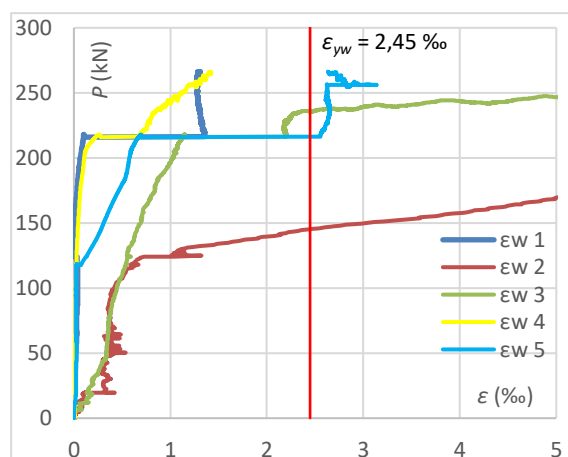


A análise do Gráfico 2 evidencia que a ruptura das vigas foi governada pelo cisalhamento, uma vez que nenhuma das armaduras de flexão atingiu a deformação de escoamento ($\epsilon_{ys} = 2,8 \text{ ‰}$) e não foi observado esmagamento do concreto comprimido, descartando a ocorrência de ruptura por flexão. Além disso, as vigas VW e VW+ apresentaram comportamento semelhante, sendo que a VW+ registrou menores deformações para um mesmo nível de carregamento, indicando que a armadura suplementar proporcionou melhores condições de ancoragem e maior rigidez à flexão.

6.2 DEFORMAÇÃO NAS ARMADURAS DE CISALHAMENTO

O gráfico 3 apresenta as deformações registradas nas armaduras de cisalhamento da viga VW durante os ensaios.

Gráfico 3 – Deformação nas armaduras de cisalhamento da viga VW.

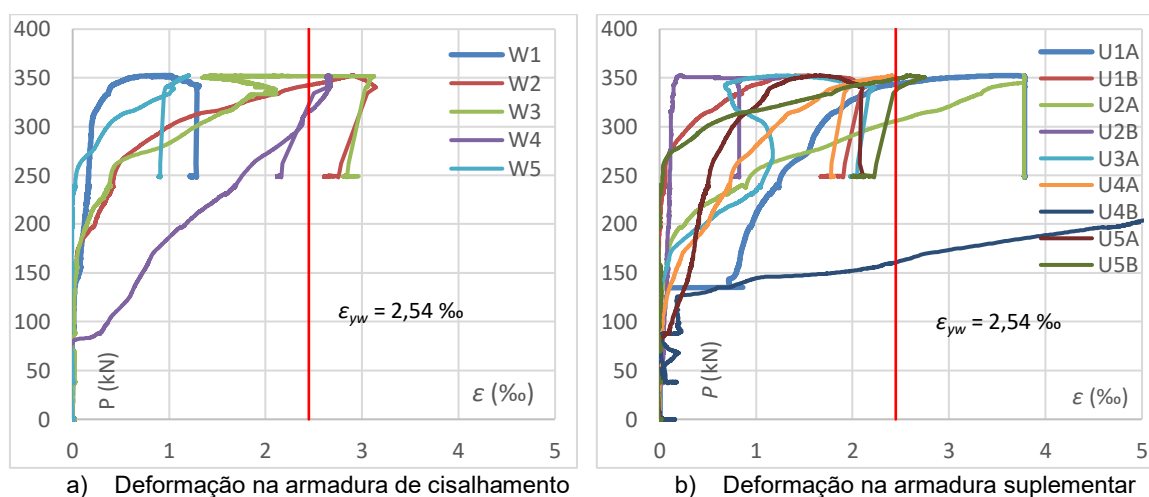


Com base no Gráfico 3, observa-se que as camadas centrais da armadura transversal passaram a apresentar deformações mais significativas a partir de aproximadamente 125 kN, nível de carregamento correspondente ao início da fissuração por cisalhamento da viga. Com o incremento do carregamento, verificou-se o aumento progressivo das deformações nessas barras, levando ao escoamento de três camadas instrumentadas antes da ruptura.

Esse comportamento demonstra que, mesmo sem a utilização de armadura suplementar, o sistema de ancoragem empregado foi capaz de mobilizar efetivamente a armadura de cisalhamento, permitindo que os estribos treliçados atingissem a deformação de escoamento. Esse resultado está de acordo com o comportamento dúctil observado durante o ensaio e com as curvas de deslocamento vertical apresentadas anteriormente.

O Gráfico 4 apresenta as deformações registradas na armadura transversal e na armadura suplementar da viga VW+.

Gráfico 4 - Deformação na armadura suplementar VW+.



Fonte: Autor

Com base no gráfico 4, verifica-se que a viga VW+ apresentou a maior capacidade resistente entre os modelos analisados. As três camadas centrais da armadura transversal atingiram a deformação de escoamento antes da ruptura, evidenciando a plena mobilização dos estribos treliçados na resistência aos esforços cortantes.

Observa-se ainda que as armaduras suplementares também foram solicitadas durante o ensaio, sendo registrado o escoamento de três ganchos, demonstrando a efetiva participação desses elementos no mecanismo resistente. Esse comportamento evidencia que a armadura suplementar atingiu seu objetivo estrutural, contribuindo para a melhoria das condições de ancoragem dos estribos treliçados e favorecendo a redistribuição dos esforços internos.

Os resultados obtidos para a viga VW+ indicam que a utilização da armadura suplementar nas faces superior e inferior da seção proporcionou maior eficiência ao sistema resistente, refletindo no aumento da capacidade resistente observado experimentalmente.

6.3 FISSURAÇÃO

A análise do quadro de fissuração é fundamental para compreender os mecanismos de transferência de esforços cortantes em elementos de concreto armado. A evolução e a distribuição das fissuras permitem identificar a transição do comportamento à flexão para o cisalhamento, bem como avaliar a eficiência das armaduras transversais e suplementares na contenção da fissuração e na preservação da integridade da biela comprimida de concreto.

Figura 24 – Quadros de fissuração das vigas VR, VW e VW+.



Fonte: Autor

Os registros experimentais apresentados sintetizam o estágio crítico das vigas próximo à ruptura, permitindo verificar se as modificações na ancoragem da armadura transversal influenciam a trajetória das tensões de tração e reduzem a ocorrência de falhas prematuras. A observação do quadro de fissuração fornece informações importantes sobre a evolução cronológica dos danos estruturais e o comportamento resistente dos modelos.

Nos três modelos, o processo de fissuração iniciou-se com fissuras verticais nas regiões de maior momento fletor. Com o aumento da carga, essas fissuras evoluíram para fissuras inclinadas de tração diagonal nos vãos de cisalhamento, caracterizando a ativação dos mecanismos resistentes do concreto, como o engrenamento dos agregados, o efeito pino e a atuação da armadura transversal. A trajetória dessas fissuras está diretamente relacionada à estabilidade da treliça resistente e à eficiência da biela comprimida.

A viga de referência (VR) representou o comportamento do concreto sem armadura transversal. Nesse modelo, a ausência de estribos impediu a redistribuição das tensões após o surgimento da fissura crítica, conduzindo à ruptura brusca por tração diagonal. Sua resistência passou a depender exclusivamente da capacidade residual do concreto e do engrenamento dos agregados, caracterizando um comportamento mais frágil.

A viga VW introduziu os estribos treliçados pré-fabricados como armadura transversal, promovendo uma distribuição mais uniforme das fissuras e maior controle da abertura das fissuras diagonais em relação à VR. Entretanto, estudos anteriores apontam que esse sistema pode apresentar vulnerabilidade à delaminação em função de limitações de ancoragem, evidenciadas pela formação de fissuras horizontais próximas à armadura longitudinal.

Com o objetivo de minimizar esse problema, a viga VW+ incorporou armaduras suplementares para reforçar a ancoragem dos módulos treliçados. Essa configuração buscou aumentar o espalhamento das fissuras, conter a propagação de fissuras horizontais e retardar a ruptura, permitindo que o mecanismo resistente da treliça fosse plenamente desenvolvido. A melhoria da ancoragem favoreceu uma interação mais eficiente entre concreto e aço e reduziu a probabilidade de falhas prematuras por perda de aderência.

A comparação entre os três modelos evidencia a evolução do comportamento

estrutural em função do detalhamento da armadura. Enquanto a VR apresentou uma fissura crítica predominante e ruptura frágil, as vigas VW e, principalmente, VW+ apresentaram um quadro de fissuração mais distribuído e controlado. Os resultados indicam que a combinação entre estribos treliçados e armaduras suplementares aumenta a estabilidade da treliça resistente, melhora o controle da delaminação e favorece a redistribuição dos esforços cortantes.

Em síntese, a análise do quadro de fissuração demonstra que o modo de ruptura está diretamente relacionado à eficiência da ancoragem da armadura transversal. Os resultados reforçam que a utilização de estribos treliçados associados a armaduras suplementares proporciona melhor controle da fissuração, maior aproveitamento da capacidade resistente do aço e comportamento mais seguro de vigas submetidas a elevados esforços cortantes.

6.4 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO

A carga aplicada pelo cilindro hidráulico foi registrada por meio da célula de carga e corresponde à carga total P transmitida ao sistema de ensaio. Em razão da geometria do aparato de distribuição, essa carga foi dividida em duas forças concentradas, correspondentes a $P1=0,76P$ e $P2=0,24P$. A análise estática do sistema indica que o maior esforço cortante atuante na viga corresponde, em módulo, a $V=0,49P$. Dessa forma, os valores registrados experimentalmente na ruptura foram inicialmente tratados como cargas últimas aplicadas, P_u , e posteriormente convertidos em esforços cortantes últimos, V_u , para a avaliação da resistência ao cisalhamento.

A Tabela 9 apresenta os principais resultados experimentais obtidos para as vigas VR, VW e VW+, incluindo a carga última, o incremento de resistência em relação à viga de referência, o esforço cortante e o modo de ruptura observado durante os ensaios.

Tabela 9 – Resultados experimentais das vigas VR, VW e VW+

Viga	P_u (kN)	V_u (kN)	P_u/P_{uVR}	P_u/P_{flex}	Região de ruptura	Fissura crítica	Mecanismo governante
VR	151,6	74,3	1,00	0,38	Região de momento negativo	Fissura diagonal principal propagada em direção à zona comprimada	Tração diagonal do concreto
VW	266,2	130,4	1,76	0,66	Região de momento	Fissura diagonal crítica atravessando a região dos	Ruptura por tração diagonal, com

					negativo	estribos treliçados	mobilização dos estribos treliçados
VW+	352,3	172,6	2,32	0,88	Região de momento negativo	Fissura diagonal crítica atravessando as camadas centrais da armadura transversal	Tração diagonal após escoamento dos estribos e ganchos

A viga VR, utilizada como modelo de referência, apresentou a menor capacidade resistente entre os modelos ensaiados, com carga última aplicada P_u de 151,6 kN, correspondente a um esforço cortante último V_u de 74,3 kN, rompendo por cisalhamento após a formação da fissura diagonal crítica, apresentando comportamento predominantemente frágil. A ausência dos estribos treliçados pré-fabricados limitou a mobilização de mecanismos adicionais de transferência de esforços, resultando em menor resistência quando comparada às vigas armadas com armadura transversal em formato W.

A utilização dos estribos treliçados pré-fabricados proporcionou aumento significativo da resistência ao cisalhamento. A viga VW, atingiu carga última aplicada de 266,2 kN, equivalente a um esforço cortante último de 130,4 kN, armada apenas com os estribos treliçados, apresentou incremento de aproximadamente 76% na carga última, em relação à viga de referência, demonstrando que esse sistema foi capaz de mobilizar de forma eficiente os mecanismos resistentes ao cisalhamento e aumentar a capacidade resistente da peça.

Entre os modelos avaliados, a viga VW+ apresentou o melhor desempenho estrutural, alcançando o maior valor de carga última com 352,3 kN e esforço cortante último de 172,6 kN. Em relação à viga de referência, foi observado incremento de aproximadamente 132% na resistência ao cisalhamento. Esse comportamento está associado à utilização da armadura suplementar nas faces superior e inferior da seção, que proporcionou melhores condições de ancoragem aos estribos treliçados, favorecendo sua mobilização e contribuindo para o aumento da capacidade resistente do modelo.

Os resultados experimentais demonstram que a associação entre os estribos treliçados pré-fabricados em formato W e a armadura suplementar constitui uma solução eficiente para o aumento da resistência ao cisalhamento em vigas contínuas submetidas à ruptura na região de momento negativo. Além do ganho de resistência observado, os resultados evidenciam que a melhoria das condições de ancoragem da armadura transversal exerce influência direta sobre o desempenho estrutural do

sistema.

A comparação entre os resultados experimentais e as prescrições da ABNT NBR 6118:2026, ACI 318-25 e Eurocode 2 (2023) permitiu avaliar a confiabilidade desses modelos para vigas com estribos treliçados pré-fabricados. A análise foi realizada por meio da relação entre a resistência experimental (V_{exp}) e a resistência calculada ($V_{C_{a1}C}$), em que valores próximos de 1,0 indicam maior precisão, enquanto valores superiores evidenciam o conservadorismo dos modelos. O objetivo foi verificar como características do sistema, como a rigidez dos estribos treliçados e a eficiência da ancoragem, influenciam o comportamento das vigas VR, VW e VW+.

Tabela 10 – Comparação das resistências experimentais com as estimativas teóricas

Viga	V_U/V_{NBRI}	V_U/V_{NBRII}	V_U/V_{ACI}	V_U/V_{EC2}
VR	1,41	1,41	1,85	1,07
VW	1,05	0,86	1,22	0,64
VW+	1,36	1,11	1,58	0,83
Média	1,27	1,13	1,55	0,85
Desvio Padrão	0,20	0,28	0,32	0,22
COV	15,3%	24,4%	20,4%	25,5%

A ABNT NBR 6118:2026 apresenta dois modelos para dimensionamento ao cisalhamento. A ABNT NBR 6118 apresenta dois modelos para a verificação da resistência ao cisalhamento. O Modelo I, baseado na adoção de uma inclinação fixa de 45° para as bielas comprimidas, apresentou relações $V_{exp}/V_{C_{a1}C}$ superiores à unidade para todas as vigas analisadas, caracterizando previsões conservadoras. O Modelo II, que permite a variação da inclinação das bielas, forneceu resultados mais próximos da unidade em parte dos casos. Entretanto, para a viga VW, foi obtida uma relação $V_{exp}/V_{C_{a1}C}$ igual a 0,86, indicando que a resistência calculada foi superior à experimental e que o modelo não foi conservador nessa situação.

Entre as normas internacionais, o ACI 318 apresentou as previsões mais conservadoras, uma vez que todas as relações $V_{exp}/V_{C_{a1}C}$ foram superiores à unidade. O Eurocode 2 apresentou resultado próximo da unidade para a viga VR, com relação igual a 1,07. Entretanto, para as vigas VW e VW+, foram obtidas relações iguais a 0,64 e 0,82, respectivamente. Esses valores indicam que o Eurocode 2 superestimou a resistência ao cisalhamento dessas vigas, fornecendo previsões não conservadoras nesses dois casos.

A análise das relações $V_{exp}/V_{C_{a1}C}$ revelou comportamentos distintos entre os

modelos normativos. O Modelo I da ABNT NBR 6118 e o ACI 318 apresentaram relações superiores à unidade para todas as vigas, caracterizando previsões conservadoras. O Modelo II da ABNT NBR 6118 apresentou resultados conservadores para as vigas VR e VW+, porém forneceu uma relação igual a 0,860,860,86 para a viga VW, indicando superestimação da resistência nesse caso. O Eurocode 2 apresentou uma previsão conservadora para a viga VR, com relação igual a 1,07, mas forneceu relações iguais a 0,64 e 0,82 para as vigas VW e VW+, respectivamente, caracterizando previsões não conservadoras. Portanto, não se pode afirmar que todos os modelos normativos forneceram estimativas conservadoras ou seguras para todas as vigas analisadas.

Os resultados também evidenciaram a importância das armaduras suplementares, como ganchos e barras de ancoragem, que proporcionaram melhor ancoragem da armadura transversal e favoreceram a mobilização mais eficiente dos estribos treliçados durante o carregamento. Dessa forma, as vigas VW e VW+ apresentaram ruptura por tração diagonal após maior participação da armadura transversal no mecanismo resistente. Esse comportamento não é considerado explicitamente pelos modelos normativos, os quais assumem condições ideais de aderência e não contemplam a contribuição adicional proporcionada por esses dispositivos de ancoragem.

Em síntese, os resultados demonstram que o sistema de estribos treliçados associado às armaduras suplementares proporcionou elevado desempenho estrutural.

O Modelo I da ABNT NBR 6118 e o ACI 318 apresentaram comportamento conservador para todas as vigas. O Modelo II da ABNT NBR 6118 apresentou boa aproximação aos resultados experimentais, porém superestimou a resistência da viga VW. O Eurocode 2 apresentou previsão conservadora apenas para a viga VR, superestimando a resistência das vigas VW e VW+, apresentaram relações V_{exp}/V_{CajC} inferiores à unidade.

7. CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo avaliar experimentalmente o comportamento ao cisalhamento unidirecional de vigas contínuas de concreto armado com estribos treliçados pré-fabricados em formato W, analisando a influência desse sistema na resistência última, no padrão de fissuração, no modo de

ruptura e na comparação com modelos normativos de dimensionamento. Para isso, foram avaliadas três vigas: uma viga de referência, denominada VR, uma viga armada com estribos treliçados pré-fabricados, denominada VW, e uma viga com estribos treliçados associados à armadura suplementar, denominada VW+.

De modo geral, os resultados obtidos demonstraram que a utilização dos estribos treliçados pré-fabricados proporcionou aumento significativo da resistência ao cisalhamento em relação à viga de referência. A viga VR apresentou a menor capacidade resistente, com carga última de 151,6 kN, rompendo de forma frágil após o desenvolvimento de uma fissura diagonal crítica. Esse comportamento evidencia a limitação dos mecanismos resistentes do concreto quando não há uma armadura transversal suficientemente eficiente para controlar a propagação das fissuras e redistribuir os esforços cortantes.

A viga VW, armada com estribos treliçados pré-fabricados, apresentou carga última de 266,2 kN, o que corresponde a um acréscimo de aproximadamente 76% em relação à viga de referência. Esse resultado indica que os estribos treliçados foram capazes de contribuir efetivamente para a resistência ao cisalhamento, promovendo melhor controle da fissuração e maior mobilização dos mecanismos resistentes. Entretanto, mesmo com o ganho de resistência, o comportamento da viga VW ainda indicou a importância das condições de ancoragem da armadura transversal para que o sistema atinja maior eficiência estrutural.

Entre os modelos avaliados, a viga VW+ apresentou o melhor desempenho, alcançando carga última de 352,3 kN e incremento de aproximadamente 132% em relação à viga VR. Esse resultado demonstra que a associação entre os estribos treliçados pré-fabricados e a armadura suplementar foi a configuração mais eficiente, uma vez que proporcionou melhores condições de ancoragem, favoreceu a mobilização da armadura transversal e contribuiu para o aumento expressivo da resistência ao cisalhamento. Além disso, a viga VW+ atingiu 88% da resistência estimada à flexão, indicando que o sistema permitiu melhor aproveitamento da capacidade resistente da peça antes da ruptura.

A análise do quadro de fissuração também confirmou a influência positiva dos estribos treliçados e das armaduras suplementares. A viga VR apresentou comportamento mais frágil, com fissuração menos distribuída e formação de uma fissura crítica predominante. A viga VW apresentou maior controle da abertura das

fissuras e melhor distribuição do dano ao longo da região solicitada. Já a viga VW+ apresentou o melhor desempenho nesse aspecto, com fissuração mais controlada e maior estabilidade do mecanismo resistente, evidenciando que a armadura suplementar contribuiu para reduzir a possibilidade de delaminação e melhorar a transferência de esforços entre o concreto e a armadura transversal.

A comparação entre os resultados experimentais e as previsões normativas demonstrou que os modelos da ABNT NBR 6118:2026, do ACI 318:2025 e do Eurocode 2:2023 apresentaram diferentes níveis de precisão para as vigas analisadas. O Modelo I da ABNT NBR 6118 e o ACI 318 apresentaram comportamento predominantemente conservador, fornecendo relações V_{exp}/V_{Calc} superiores à unidade para todos os modelos experimentais. O Modelo II da ABNT NBR 6118 e o Eurocode 2 apresentaram, em geral, melhor aproximação aos resultados experimentais; entretanto, observaram-se relações inferiores a 1,0 em alguns casos, indicando que esses modelos superestimaram a resistência ao cisalhamento e, portanto, não apresentaram comportamento conservador para todas as vigas.

Esses resultados demonstram que, embora os procedimentos normativos sejam capazes de representar satisfatoriamente o comportamento global das vigas analisadas, seu desempenho varia conforme a configuração da armadura transversal e as condições de ancoragem. Dessa forma, conclui-se a necessidade de aperfeiçoamentos para contemplar de forma mais adequada sistemas alternativos de armadura transversal, como os estribos treliçados pré-fabricados associados a armaduras suplementares.

Com base nos resultados obtidos, conclui-se que os estribos treliçados pré-fabricados em formato W+ constituem uma alternativa eficiente para o aumento da resistência ao cisalhamento de vigas contínuas de concreto armado. A utilização de armaduras suplementares mostrou-se essencial para melhorar o desempenho do sistema, uma vez que contribuiu para o controle da fissuração, reduziu a tendência à delaminação, favoreceu a ancoragem e permitiu maior aproveitamento da resistência da armadura transversal. Assim, o sistema estudado apresentou desempenho estrutural promissor, principalmente quando associado a detalhamentos que garantam adequada transferência de esforços entre aço e concreto.

Por fim, ressalta-se que os resultados deste trabalho contribuem para ampliar

o conhecimento sobre o comportamento de vigas contínuas armadas com estribos treliçados pré-fabricados, especialmente em condições de carregamento diferentes daquelas usualmente avaliadas em vigas simplesmente apoiadas. No entanto, por se tratar de uma análise experimental com número limitado de modelos, recomenda-se a realização de novos estudos com diferentes taxas de armadura transversal, diferentes posições e geometrias de armaduras suplementares, variação da relação a/d , diferentes resistências do concreto e maior número de vigas ensaiadas. Também se recomenda o desenvolvimento de análises numéricas e estudos comparativos mais amplos com modelos normativos, a fim de contribuir para futuras recomendações de dimensionamento específicas para esse tipo de armadura transversal.

8. REFERÊNCIAS

ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS NBR 6118:2026. **Projeto de Estruturas de Concreto** – Procedimento. Rio de Janeiro

ACI 318 (2025). **Building Code Requirements for Structural Concrete**. American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan.

ACI 421.1R-08 (2008). **Guide to Shear Reinforcement for Slabs**. American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan.

ADAM, V.; SCHMIDT, M.; HEGGER, J. (2022). **One-way flexural shear tests on wide reinforced concrete slab segments with simple and intermediate supports**. Structural Concrete, pp. 1-19.

BAZANT, Z. P. (1984). Size Effect in Blunt Fracture: Concrete, Rock, Metal. **Journal of Engineering Mechanics**, ASCE, V. 110, No.4, pp. 518-535.

BAZANT, Z. P.; OZBOLT, J.; ELIGEHAUSEN, R. (1994). Fracture Size Effect: Review of Evidence for Concrete Structures. **Journal of Structural Engineering**, Vol. 120, No.8. pp. 2377-2398.

BEUTEL, R.; HEGGER, J. (2002). The Effect of Anchorage on the Effectiveness of the Shear Reinforcement in the Punching Zone. **Cement & Concrete Composite**. Vol. 24, pp 539-549.

CAMPANA, S., ANASTASI, A., FERNÁNDEZ RUIZ, M., MUTTONI, A. (2013). Analysis of Shear Transfer Actions on One-way RC Members Based on Measured Cracking Pattern and Failure Kinematics. **Magazine of Concrete Research**. Vol. 56, No. 6, pp. 386–404.

CHANA, PS (1987). Investigation of the mechanism of shear failure of reinforced concrete beams. **Magazine of Concrete Research**. Vol. 39, No. 141, pp. 196-204.

DEI POLI, S., DI PRISCO, M., GAMBAROVA, P., G. (1993). Cover and Stirrup Effects on the Shear Response of Dowel Bar Embedded in Concrete. **ACI Structural Journal**. Vol. 90, No. 4, pp. 441–450.

EN 1992-1-1 (2004). **Eurocode 2: Design of Concrete Structures—Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings**. CEN, EN 1992-1-1, Brussels, Belgium.

EN 1992-1-1 (2023). **Eurocode 2: Design of Concrete Structures—Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings**. CEN, EN 1992-1-1, Brussels, Belgium.

FERNÁNDEZ RUIZ, M., MIRZAEI, Y., MUTTONI, A. (2013). Post-punching Behavior of Fat Slabs. **ACI Structural Journal**. Vol. 110, No. 5, pp. 801–812.

FERREIRA, M.P.; BARROS, R.M.N.; PEREIRA FILHO, M.J.M.; TAPAJÓS, L.S.; QUARESMA, F.S. (2016) One-Way Shear Resistance of RC Members with Unconnected Stirrups. **Latin American Journal of Solids and Structures**. Vol. 13, pp. 2670-2690.

FERREIRA, M.P.; PEREIRA FILHO, M.J.M.; FREITAS, M.V.P.; LIMA NETO, A.F.; MELO, G.S.S.A. (2021) Experimental resistance of slab-column connections with prefabricated truss bars as punching shear reinforcement. **Engineering Structures**. Vol. 233, pp. 111903-111917.

FISKER, J.; HAGSTEN, L.G. (2016). Mechanical Model for the Shear Capacity of R/C Beams without Stirrups: A proposal Based on Limit Analysis. **Engineering Structures**. Vol. 115, pp. 220-231.

HILLEBRAND, M.; HEGGER, J. (2023). Shear and interface shear of semi-precast slabs with lattice girders under monotonic loading. **Structural Concrete**. Vol. 110, No. 5, pp. 801–812.

HILLERBORG, A. (1983). **Analysis of a Single Crack**. Fracture mechanics of concrete. Amsterdam, Netherlands, pp. 223–249.

HORDIJK, D.A. (1992). Tensile and Tensile Fatigue Behaviour of Concrete, Experiments, Modelling and Analyses. **Heron**. Vol. 37, No. 1, pp. 3–79.

HU, B.; WU, Y. (2018). Effect of shear span-to-depth ratio on shear strength components of RC Beams. **Engineering Structures**, Vol. 168, pp. 770-783.

JELIC, I., PAVLOVIC, M.N, KOTSOVOS, M.D. (1999). A Study of Dowel Action in Reinforced Concrete Beams. **Magazine of Concrete Research**. Vol. 2, No. 2, pp.131–141.

KANI, G.N. (1964). The Riddle of Shear Failure and its Solution. **ACI Journal**. Vol. 61, No. 4, pp. 441-468.

KREFELD, W.; THURSTON, C.W. (1966). Contribution of Longitudinal Steel to Shear Resistance of Reinforced Concrete Beams. **ACI Journal**. Vol. 63, No. 3, pp. 325–344.

LUBELL, A.S.; BENTZ, E.C.; COLLINS, M.P. (2009). Shear Reinforcement Spacing in Wide Members. **ACI Structural Journal**, Vol. 106, No. 2, pp. 205-214.

MARÍ, A. (2024). Questions on Shear Behavior of Structural Concrete and Answers Provided by Mechanical Models. The Challenge of Performance-Based Shear Design. **Hormigón y Acero**, Vol. 75, pp 77-94.

MOHAMMADYAN-YASOUJ, S.E.; MARSONO, A.K.; ABDULLAH, R.; MOGHADASI, M. (2015). Wide Beam Shear Behavior with Diverse Types of Reinforcement. **ACI Structural Journal**, Vol. 112, No. 2, pp. 199-208.

MUTTONI, A.; FERNÁNDEZ RUIZ, M. (2008). Shear Strength of Members without Transverse Reinforcement as Function of Critical Shear Crack Width. **ACI Structural Journal**. Vol. 105, No. 2, pp. 163-172.

PINTO, R. S.; SOUSA, V.C.; TAPAJÓS, L.S.; FERREIRA, M.P; LIMA NETO, A.F. (2022) Influence of the Supplementary Reinforcement on the Shear Strength of

Beams with Prefabricated Truss Stirrups. **Rev. IBRACON Estrut. Mater.**, vol. 15, no. 1, e15106.

REGAN, P.E. (1971). **Shear in Reinforced Concrete – an Analytical Study**. Technical Note 46, London, Construction Industry Research & Information Association (CIRIA), p. 199.

REGAN, P. E. (2000). Shear Reinforcement of Flat Slabs. **International Workshop on Punching Shear Capacity of RC Slabs - Proceedings**, TRITA-BKN, Bulletin 57, pp. 99-107.

SAGASETA, J.; VOLLUM, R. L. (2011). Influence of Aggregate Fracture on Shear Transfer through Cracks in Reinforced Concrete. **Magazine of Concrete Research**. Vol. 63, No. 2, pp. 119-137.

SCHMIDT, Philipp; KALUS, Matthias; HEGGER, Josef. Critical view on the level of maximum punching strength of flat slabs and column bases using database evaluations. **Structural Concrete**, [S. l.], v. 22, n. 6, p. 3646–3660, 2021.

SOLTANI, M.; INDURKAR, S.; ROSS, B.E. (2016). Stud Rail Systems as Shear Reinforcement in Beams and One-Way Slabs. **ACI Structural Journal**, Vol. 113, No. 3, pp. 587-594.

SOUSA, Alex M. D.; LANTSOGHT, Eva O. L.; EL DEBS, Mounir K. **Databases of one-way slabs under concentrated loads: parameter analyses and validation of the proposed approach**. Geneva: Zenodo, 2022

SOUZA, Diego Ferreira de; ABRANTES, Jedson Henryque Correa; TAPAJÓS, Luamim Sales; FERREIRA, Mauricio de Pina; LIMA NETO, Aarão Ferreira. Shear in reinforced concrete beams with continuous internal transverse reinforcement. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, São Paulo, v. 16, n. 1, e16106, 2023.

TAHA, M.G.; ABBAS, A.L. (2021). **Effect of Longitudinal Maximum Spacing of Shear Reinforcement for wide Reinforced Concrete Beams**. IOP Conf. Ser.:

Mater. Sci. Eng. **1076** 012118.

TAPAJÓS, L.S. (2017) **Cisalhamento em elementos de concreto armado com estribos desconectados**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Oeste do Pará, Belém.

TAPAJÓS, L.S.; PEREIRA FILHO, M.J.M.; LIMA NETO, A.F.; MARQUES, G.M.; FERREIRA, M.P. (2025). Structural performance of innovative truss-shaped stirrups in one-way reinforced concrete members. **Structures**, Vol. 79, pp. 1-15.

TAYLOR, H. P. J. (1970). **Investigation of the Forces Carried across Cracks in Reinforced Concrete Beams in Shear by Interlock of Aggregate**. Technical report 42. CCA, London.

TIRASSA, M.; FERNÁNDEZ RUIZ, M.; MUTTONI, A. (2020). Influence of craking and rough surface properties on the transfer of forces in cracked concrete. **Engineering Structures**, Vol. 15, pp. 111-138.

ULAGA, T. (2003). **Reinforced Concrete Elements with Reinforcement Composed of Bars and Strips: Bond and Tension Modelling**. PhD thesis. ETHZ, Zurich, Switzerland.

VALENTE, C. S.; MACHADO, S. C.; COSTA, M. G.; TAPAJÓS, L. S.; FERREIRA, M. P.; PEREIRA FILHO, M. J. M. (2023). **Limites de Eficiência de Estribos como Armadura de Punção em Ligações Laje-Pilar**. Anais do 64º Congresso Brasileiro do Concreto – CBC2023. Florianópolis, SC, Brasil. Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON), 2023..

WALRAVEN, J. C. (1980). **Aggregate Interlock: a Theoretical and Experimental Analysis**. Ph.D Thesis, Delft University of Technology, Netherlands.

WIGHT, J.K., MACGREGOR, J.G. (2012). **Reinforced Concrete: Mechanics and Design**. Pearson, 6th Edition.