



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE TUCURUÍ
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL

ERICK LORRAN MARTINS VIEIRA

JHONATHAN SANTOS SILVA

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL À PUNÇÃO EM MESAS DE VIGA
T INVERTIDAS**

TUCURUÍ
2026

ERICK LORRAN MARTINS VIEIRA

JHONATHAN SANTOS SILVA

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL À PUNÇÃO EM MESAS DE VIGA
T INVERTIDAS**

Trabalho de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Civil, do Campus Universitário de Tucuruí, da Universidade Federal do Pará, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Manoel José M. P. Filho

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

M379a Martins Vieira, Erick Lorrان.
ANÁLISE DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL À
PUNÇÃO EM MESAS DE VIGA T INVERTIDAS / Erick Lorrان
Martins Vieira, Jhonathan Santos Silva. — 2026.
LII, 52 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Manoel José Mangabeira Pereira Filho
Trabalho de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Pará,
Campus Universitário de Tucuruí, Faculdade de Engenharia Civil,
Tucuruí, 2026.

1. Punção. 2. Vigas T invertidas. 3. Concreto armado. 4.
Carregamentos pontuais. 5. Comportamento estrutural. I.
Silva, Jhonathan Santos. II. Título.

CDD 624.18341

ERICK LORRAN MARTINS VIEIRA

JHONATHAN SANTOS SILVA

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL À PUNÇÃO EM MESAS DE VIGA T INVERTIDAS

Trabalho de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Civil, do Campus Universitário de Tucuruí, da Universidade Federal do Pará, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Data da aprovação: 18 / 09 / 2026

Conceito: B

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente



MANOEL JOSE MANGABEIRA PEREIRA FILHO

Data: 07/10/2026 14:52:26-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Manoel José Mangabeira Pereira Filho

Orientador / UFPA

PAULO SERGIO

BARREIROS DE LEAO

JUNIOR:0473791226

3

Assinado de forma

digital por PAULO

SERGIO BARREIROS DE

LEAO

JUNIOR:04737912263

Prof. Me. Paulo Sérgio Barreiros de Leão Junior

Examinador Interno / UFPA

Documento assinado digitalmente



MATEUS LEAL SANTOS

Data: 06/10/2026 15:10:14-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Eng. Esp. Mateus Leal Santos
Examinador Externo / Construtora Capitólio

Dedicamos este trabalho aos nossos familiares, que estiveram ao nosso lado durante toda a nossa trajetória, oferecendo apoio, incentivo e compreensão nos momentos mais difíceis. Cada palavra de motivação, cada gesto de carinho e cada demonstração de confiança foram importantes para que pudéssemos continuar seguindo em frente.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradecemos a Deus pela força, saúde e perseverança ao longo de toda a nossa trajetória acadêmica. A conclusão deste trabalho representa o encerramento de uma etapa marcada por desafios, aprendizados e momentos de superação, sendo resultado de muita dedicação e do apoio das pessoas que estiveram ao nosso lado durante esse percurso.

Aos nossos familiares, agradecemos pelo apoio, incentivo e compreensão durante toda a graduação. Em muitos momentos, foram eles que nos deram forças para continuar diante das dificuldades e responsabilidades encontradas ao longo do curso. O incentivo recebido foi fundamental para que pudéssemos seguir em frente e alcançar esta importante etapa de nossa formação.

Aos professores que contribuíram para nossa formação acadêmica, agradecemos pelos conhecimentos transmitidos, pelas experiências compartilhadas e pelas orientações ao longo da graduação. Em especial, agradecemos ao nosso orientador, pela disponibilidade, pelas contribuições e pelo acompanhamento durante o desenvolvimento deste trabalho, auxiliando-nos na organização e no aprimoramento da pesquisa.

Aos nossos colegas e amigos, agradecemos pela convivência, pela troca de conhecimentos e pelo apoio durante essa caminhada. As experiências compartilhadas ao longo da graduação contribuíram não apenas para nossa formação acadêmica, mas também para nosso crescimento pessoal e profissional, tornando mais leve o enfrentamento dos desafios encontrados durante o curso.

As contribuições recebidas durante o desenvolvimento da pesquisa foram importantes para que os objetivos propostos fossem alcançados e para que pudéssemos aprofundar nossos conhecimentos sobre o tema estudado.

Agradecemos também a todos que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho, especialmente aqueles envolvidos nas etapas relacionadas aos estudos experimentais, à obtenção dos dados e à análise do comportamento estrutural das vigas de concreto armado com seção “T” invertida. Por fim, agradecemos à Universidade Federal do Pará (UFPA) pela oportunidade de formação e pelos conhecimentos adquiridos ao longo da graduação. A realização deste trabalho representa o encerramento de uma etapa importante de nossa trajetória e o resultado de anos de dedicação, aprendizado e crescimento.

“Nossa maior glória não é nunca cair, mas levantar cada vez que caímos.”

Confúcio

RESUMO

A punção em mesas de vigas T invertidas de concreto armado representa um fenômeno estrutural de grande importância para o desempenho e a segurança de elementos submetidos a carregamentos concentrados, podendo comprometer sua capacidade resistente quando não considerada adequadamente em projeto. Nesse contexto, este trabalho teve como objetivo analisar o comportamento estrutural à punção em mesas de vigas T invertidas de concreto armado, a partir da integração e da análise comparativa dos resultados obtidos em duas campanhas experimentais envolvendo modelos biapoiados e em balanço. A pesquisa caracteriza-se como um estudo de natureza aplicada, com abordagem qualitativa e quantitativa, fundamentado na análise de resultados experimentais previamente publicados na literatura técnica. Para o desenvolvimento do estudo, foram avaliadas as características geométricas dos modelos, as propriedades mecânicas dos materiais, o detalhamento das armaduras, as condições de apoio, os procedimentos experimentais e os mecanismos de ruptura observados durante os ensaios. Posteriormente, os resultados experimentais foram comparados às previsões da AASHTO LRFD, considerando a capacidade resistente, o comportamento das fissuras e os modos de ruptura. Os resultados demonstraram que a ruptura por punção constituiu o mecanismo de falha predominante em todos os modelos analisados, sendo observada influência da configuração estrutural na capacidade resistente das vigas e na distribuição das fissuras. Verificou-se, ainda, que as previsões da AASHTO LRFD apresentaram comportamento conservador em relação aos resultados experimentais. A integração das duas campanhas experimentais possibilitou uma avaliação conjunta do comportamento estrutural das mesas de vigas T invertidas, ampliando a compreensão sobre a influência das diferentes configurações estruturais na resistência à punção e fornecendo subsídios técnicos para o aprimoramento das análises, do dimensionamento e de futuras pesquisas relacionadas a esse tipo de elemento estrutural.

Palavras-chave: Punção; vigas T invertidas; concreto armado; carregamentos pontuais; comportamento estrutural.

ABSTRACT

Punching shear in the flanges of inverted T-shaped reinforced concrete beams is a structural phenomenon of significant importance to the performance and safety of elements subjected to concentrated loads, as it may compromise their load-bearing capacity if not properly considered during the design process. In this context, this study aimed to analyze the structural behavior of punching shear in the flanges of inverted T-shaped reinforced concrete beams through the integration and comparative analysis of results obtained from two experimental programs involving simply supported and cantilever beam models. The research is characterized as an applied study with qualitative and quantitative approaches, based on the analysis of experimental results previously published in the technical literature. The study evaluated the geometric characteristics of the models, the mechanical properties of the materials, the reinforcement detailing, the support conditions, the experimental procedures, and the failure mechanisms observed during the tests. Subsequently, the experimental results were compared with the predictions provided by the AASHTO LRFD specifications, considering load-bearing capacity, crack development, and failure modes. The results showed that punching shear was the predominant failure mechanism in all analyzed models, demonstrating that the structural configuration influenced both the load-bearing capacity of the beams and the crack distribution. Furthermore, the predictions provided by AASHTO LRFD exhibited conservative behavior when compared with the experimental results. The integration of the two experimental programs enabled a comprehensive evaluation of the structural behavior of inverted T-shaped beam flanges, improving the understanding of the influence of different structural configurations on punching shear resistance and providing technical support for the improvement of structural analysis, design procedures, and future research related to this type of structural element.

Keywords: Punching shear; Inverted T-shaped beams; Reinforced concrete; Concentrated loads; Structural behavior.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Aplicação de viga T invertida em estrutura de ponte	18.
Figura 2 – Distribuição das tensões e deformações em seção transversal de concreto armado	21.
Figura 3 – Modos de ruptura verificados pela AASHTO LRFD (2020)	23.
Figura 4 – Projeto para cisalhamento de punção na mesa (baseado nas especificações de projeto de pontes AASHTO LRFD)	24.
Figura 5 – Projeto para atrito de cisalhamento (baseado nas especificações de projeto de pontes AASHTO LRFD)	27.
Figura 6 – Dimensionamento ao cisalhamento por punção com base nas especificações da AASHTO LRFD para projetos de pontes	28.
Figura 7 – Projeto para o reforço do pendurador	29.
Figura 8 - Projeto para capacidade à flexão de saliência baseado nas Especificações da AASHTO LRFD	30.
Figura 9 – Demonstração do cálculo das áreas A1 e A2	30.
Figura 10 – Representação de um ensaio realizado em viga de concreto armado	32.
Figura 11 – Representação da geometria e armadura da viga V5	34.
Figura 12 – Representação da geometria e armadura da V7	34.
Figura 13 – Representação da geometria e armação da viga V1	35.
Figura 14 – Representação da geometria e armação da viga V2	35.
Figura 15 – Representação da moldagem dos corpos de prova cilíndricos	36.
Figura 16 – Sistema de ensaio das vigas biapoçadas	38.
Figura 17 – Sistema das vigas em balanço	38.
Figura 18 – Padrão de fissuração da V5	43.
Figura 19 – Padrão de fissuração da V7	44.
Figura 20 – Padrão de fissuração da V1	46.
Figura 21 – Padrão de fissuração da V3	47.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades mecânicas dos materiais utilizados nos modelos experimentais	41.
Tabela 2 – Resultados experimentais das vigas biapoiadas	42.
Tabela 3 – Resultados experimentais das vigas em balanço	45.
Tabela 4 – Comparação geral entre os modelos experimentais	48.

LISTA DE ABREVIATURAS

mm	milímetro
CA	Concreto Armado
MPa	Megapascal
kN	quilonewton

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AASHTO LRFD	American Association Of State Highway And Transportation Officials

LISTA DE SÍMBOLOS

$\emptyset$	Diâmetro
‰	Permilagem
V_u	Carga última resistente obtida experimentalmente
V_{teo}	Capacidade resistente teórica estimada pela AASHTO LRFD
V_n	Resistência nominal ao cisalhamento
f_c	Resistência à compressão do concreto
f_y	Tensão de escoamento do aço
E_s	Módulo de elasticidade do aço
A_{hr}	Área de uma perna da armadura de suspensão
s	Espaçamento das barras de armadura de suspensão
A_1	Área sob o dispositivo de apoio
A_2	Área ampliada considerada na verificação do apoio
m	Fator de modificação utilizado na verificação do esmagamento no apoio
$\frac{a}{d}$	Relação entre o vão de cisalhamento e a altura útil
a_f	Distância do ponto de aplicação da carga até a face da alma
a_v	Distância da borda do apoio até a face da alma
A_{vf}	Área da armadura para atrito de cisalhamento
b_f	Largura da mesa da viga T invertida
b_w	Largura da alma da viga
c	Distância do centro do apoio até a extremidade da mesa (bordo livre)
d_e	Altura útil da mesa da viga
f'_c/f_c	Resistência à compressão do concreto
f_{ct}	Resistência à tração por compressão diametral do concreto
f_y/f_{ys}	Tensão de escoamento do aço
h	Altura total da viga
h_f	Altura (espessura) da mesa da viga
L	Comprimento do dispositivo de apoio ao longo do eixo da viga

P_n	Capacidade nominal ao esmagamento do concreto no apoio
S	Espaçamento centro a centro entre pontos de apoio de cargas
V_n/V_{teo}	Capacidade resistente teórica nominal estimada por norma
V_{ni}	Resistência nominal ao atrito de cisalhamento
W	Largura do dispositivo de apoio perpendicular ao eixo da viga
ε_{ys}	Deformação de escoamento do aço

SUMÁRIO

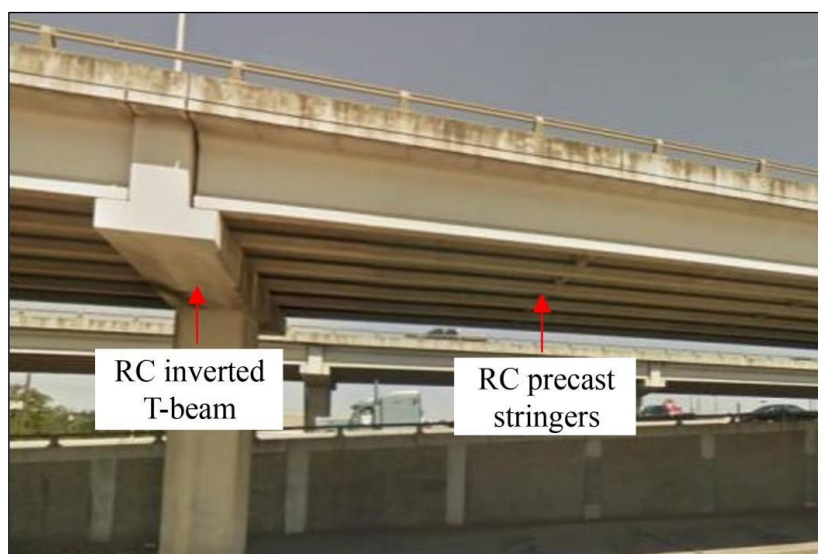
1	INTRODUÇÃO.....	18
1.1	Objetivos.....	19
1.1.1	Objetivo Geral	19
1.1.2	Objetivo Específico.....	19
1.2	Justificativa.....	19
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	21
2.1	Concreto armado e comportamento estrutural.....	21
2.2	Vigas de Seção T Invertida.....	22
2.3	Punção em estruturas de concreto armado	23
2.4	Punção em Mesas de Vigas T Invertidas	25
2.5	Recomendações Normativas	26
2.5.1	Cisalhamento entre a mesa e a alma	27
2.5.2	Punção na mesa.....	27
2.5.3	Esforços de tração na alma.....	28
2.5.4	Flexão na mesa.....	29
2.5.5	Esmagamento no aparelho de apoio.....	30
3	METODOLOGIA	32
3.1	Classificação da pesquisa	32
3.2	Programa experimental.....	33
3.3	Caracterização dos modelos experimentais	33
3.3.1	Vigas biapoiadas	33
3.3.2	Vigas em balanço.....	34
3.4	Caracterização dos materiais.....	35
3.5	Sistema de ensaio	37
3.5.1	Vigas biapoiadas	37
3.5.2	Vigas em balanço.....	38
3.6	Procedimento experimental	38
3.7	Crterios para análise dos resultados experimentais	39
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	41

4.1	Caracterização dos materiais.....	41
4.2	Comportamento estrutural das vigas biapoiadas	41
4.3	Comportamento estrutural das vigas em balanço	45
4.4	Análise comparativa do comportamento estrutural dos modelos experimentais.....	47
5	CONCLUSÃO	50
	REFERÊNCIAS.....	51

1 INTRODUÇÃO

As vigas de seção “T” invertida são bastante utilizadas em estruturas de pontes e viadutos, principalmente como travessas responsáveis pela transferência de cargas entre os elementos estruturais. Esse tipo de seção apresenta vantagens relacionadas ao aproveitamento do espaço estrutural e à facilidade de apoio das longarinas sobre as mesas inferiores da viga. A aplicação desse sistema em estruturas de pontes pode ser observada na figura 1, na qual se identifica a viga T invertida utilizada como elemento de apoio para as longarinas pré-moldadas.

Figura 1 – Aplicação de viga T invertida em estrutura de ponte.



Fonte: Atta *et. al* (2024)

Apesar disso, a aplicação de cargas concentradas nessas regiões pode gerar elevados níveis de tensão, favorecendo o surgimento de mecanismos de ruptura considerados críticos, como a punção. Diferente de outros tipos de falha mais dúcteis, a ruptura por punção ocorre de maneira brusca, com pouca capacidade de aviso prévio, o que representa um risco significativo para a segurança da estrutura.

Embora existam diversos estudos relacionados à punção em lajes de concreto armado, o comportamento desse fenômeno em mesas de vigas “T” invertidas ainda possui quantidade limitada de pesquisas, principalmente quando associado a carregamentos pontuais próximos aos apoios ou em regiões de balanço. Além disso, a ABNT NBR 6118:2023 não apresenta recomendações específicas para esse tipo de situação, fazendo com que normas internacionais, como a AASHTO LRFD (2020), sejam utilizadas como principal referência para avaliação desse modo de ruptura.

Nesse contexto, torna-se importante ampliar os estudos experimentais voltados ao comportamento estrutural dessas vigas, buscando compreender de que forma fatores como posição

da carga, condições de apoio e relação entre esforços influenciam na capacidade resistente e nos mecanismos de ruptura desenvolvidos.

Dessa forma, este trabalho busca analisar experimentalmente o comportamento à punção em mesas de vigas “T” invertidas de concreto armado submetidas a carregamentos pontuais, avaliando os padrões de fissuração, as cargas últimas de ruptura e os modos de falha observados durante os ensaios, além de comparar os resultados experimentais com as recomendações previstas pela norma AASHTO LRFD (2020).

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Analisar experimentalmente o comportamento estrutural à punção em mesas de vigas “T” invertidas de concreto armado submetidas a carregamentos pontuais.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Avaliar o comportamento estrutural das vigas “T” invertidas submetidas a cargas concentradas;
- Investigar os padrões de fissuração e os modos de ruptura desenvolvidos nas mesas das vigas;
- Determinar experimentalmente as cargas últimas resistentes dos modelos analisados;
- Verificar a influência da posição das cargas e das condições de apoio no comportamento à punção;
- Comparar os resultados experimentais com as recomendações da norma AASHTO LRFD (2020).

1.2 Justificativa

O uso de vigas “T” invertidas em estruturas de pontes e viadutos vem crescendo devido às vantagens estruturais e construtivas que esse sistema apresenta. Entretanto, a presença de cargas concentradas aplicadas diretamente nas mesas dessas vigas pode provocar elevados estados de tensão, favorecendo o aparecimento de rupturas frágeis por punção.

Mesmo sendo um fenômeno importante para a segurança estrutural, ainda existem poucos estudos voltados especificamente para o comportamento da punção em mesas de vigas “T” invertidas, principalmente considerando diferentes condições de carregamento e apoio. Além disso, as normas brasileiras ainda apresentam limitações relacionadas ao dimensionamento desse

tipo de situação, fazendo com que muitas análises sejam baseadas em recomendações internacionais.

Diante disso, o desenvolvimento desta pesquisa se justifica pela necessidade de ampliar o conhecimento experimental sobre o comportamento estrutural dessas vigas, contribuindo para uma melhor compreensão dos mecanismos de ruptura envolvidos e para a avaliação da aplicabilidade das recomendações da norma AASHTO LRFD (2020).

Além da contribuição acadêmica, os resultados obtidos podem auxiliar futuramente no dimensionamento mais seguro de travessas de pontes e outros elementos estruturais submetidos a carregamentos concentrados, reduzindo riscos associados a rupturas frágeis e melhorando a confiabilidade estrutural dessas estruturas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

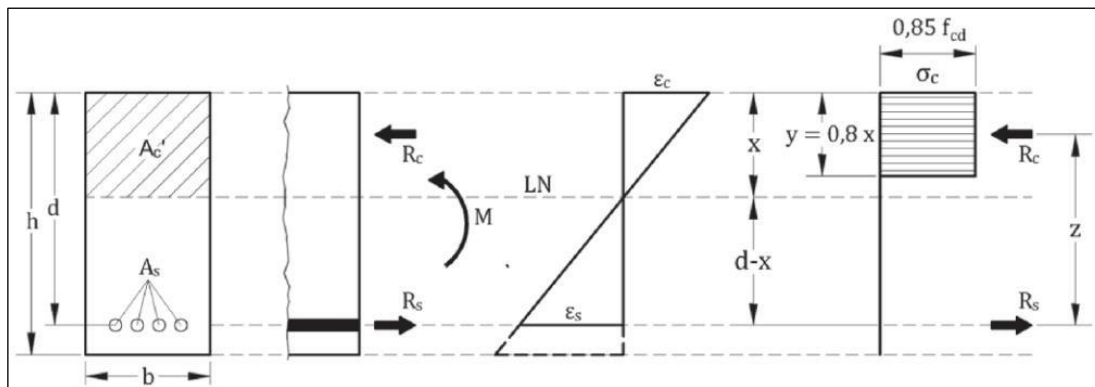
2.1 Concreto armado e comportamento estrutural

O concreto armado é um dos principais materiais utilizados na construção civil devido à sua capacidade de combinar a resistência à compressão do concreto com a resistência à tração do aço. Segundo a ABNT NBR 6118 (2023), essa associação permite que os elementos estruturais apresentem desempenho satisfatório frente aos diferentes esforços atuantes nas estruturas, como flexão, compressão, tração e cisalhamento.

De acordo com Bastos (2019), o concreto apresenta elevada capacidade resistente à compressão, porém possui baixa resistência à tração, tornando necessária a utilização de armaduras de aço para absorção desses esforços. Além disso, a aderência entre os materiais garante o funcionamento conjunto da estrutura, permitindo maior eficiência no comportamento resistente do elemento estrutural.

Enquanto o concreto apresenta maior contribuição na resistência aos esforços de compressão, as armaduras de aço desempenham papel fundamental na resistência aos esforços de tração. A Figura 2 apresenta, de forma esquemática, a distribuição das tensões e deformações em uma seção transversal de concreto armado, evidenciando a atuação conjunta do concreto comprimido e da armadura tracionada.

Figura 2 – Distribuições das tensões e deformações em seção transversal de concreto armado



Fonte: Pellizzer et. al (2018)

Segundo Carvalho e Figueiredo Filho (2014), o comportamento estrutural dos elementos de concreto armado depende diretamente de fatores como geometria da peça, propriedades mecânicas dos materiais, detalhamento das armaduras e condições de carregamento. Em situações envolvendo cargas concentradas, podem surgir elevadas tensões localizadas capazes de provocar mecanismos de ruptura relacionados ao cisalhamento e à punção.

Para Leonhardt e Mönnig (1977), os esforços cisalhantes merecem atenção especial em estruturas de concreto armado devido à possibilidade de ocorrência de rupturas frágeis e

repentinamente. Em estruturas de pontes e viadutos, esses fenômenos tornam-se ainda mais relevantes em razão da presença de carregamentos elevados e regiões sujeitas à transferência direta de forças entre diferentes elementos estruturais.

Além disso, Fusco (2013) destaca que o desempenho estrutural adequado depende não apenas da resistência dos materiais, mas também do correto detalhamento das armaduras e da compreensão dos mecanismos resistentes envolvidos. Dessa forma, o estudo do comportamento estrutural do concreto armado torna-se fundamental para garantir segurança e durabilidade às estruturas.

2.2 Vigas de Seção T Invertida

As vigas de seção “T” invertida são empregadas em diferentes sistemas estruturais, especialmente em estruturas de pontes e viadutos, nas quais podem atuar como travessas responsáveis pela transferência de cargas entre as longarinas e os apoios. Segundo Garber et al. (2017), esse tipo de seção apresenta vantagens relacionadas à redução da altura da superestrutura e à possibilidade de utilização das mesas inferiores como regiões de apoio para os elementos estruturais.

A configuração geométrica dessas vigas também exerce influência sobre a maneira como os esforços são distribuídos ao longo do elemento estrutural. Segundo Garber et al. (2017), as vigas T invertidas apresentam uma geometria caracterizada pela presença de uma borda ou mesa inferior destinada ao apoio de elementos estruturais, o que modifica significativamente o mecanismo de transferência das cargas em relação às vigas de seção convencional.

Nessa configuração, as longarinas são apoiadas sobre a mesa da viga, fazendo com que as cargas sejam introduzidas de maneira localizada na região da borda e posteriormente transferidas para o tramo da seção. Dessa forma, a geometria da viga T invertida está diretamente relacionada ao comportamento estrutural da região de apoio, especialmente quanto aos mecanismos de transferência de carga e às possíveis formas de ruptura local.

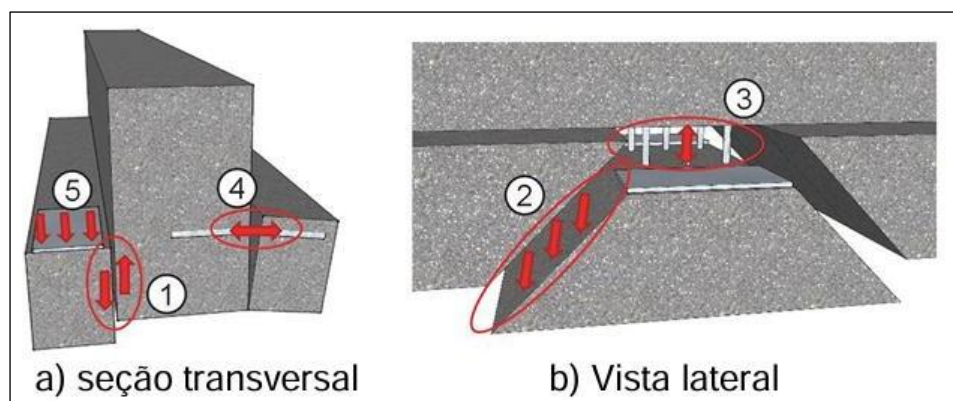
A utilização das mesas inferiores como regiões de apoio, entretanto, proporciona uma condição particular de transferência de esforços que precisa ser considerada durante a análise estrutural. Segundo as recomendações da AASHTO LRFD (2020), os carregamentos provenientes das longarinas podem atuar de forma concentrada sobre as mesas das vigas T invertidas, produzindo elevados níveis de tensão em regiões específicas do elemento. A concentração desses esforços torna necessário avaliar o comportamento da mesa diante das solicitações impostas.

As características da seção e das condições de carregamento também interferem na maneira como os esforços são transferidos entre a mesa e a alma da viga. Nesse contexto, o detalhamento

das armaduras assume importância para o funcionamento adequado do elemento, especialmente nas regiões submetidas à introdução concentrada de cargas. A disposição dessas armaduras deve ser compatível com o caminho de transferência dos esforços e com os mecanismos resistentes desenvolvidos na seção.

As recomendações da AASHTO LRFD (2020) consideram diferentes formas de comportamento associadas à transferência desses esforços, envolvendo mecanismos relacionados à punção, ao cisalhamento e à flexão da mesa. A Figura 3 apresenta esquematicamente os cinco principais mecanismos de ruptura seguintes: Cisalhamento entre a mesa e a alma (1); punção na mesa (2); esforços de tração na alma (3); flexão da mesa (4) e esmagamento no aparelho de apoio (5), associados às regiões submetidas aos carregamentos concentrados, permitindo visualizar diferentes possibilidades de resposta estrutural.

Figura 3 – Modos de ruptura verificados pela AASHTO LRFD (2020).



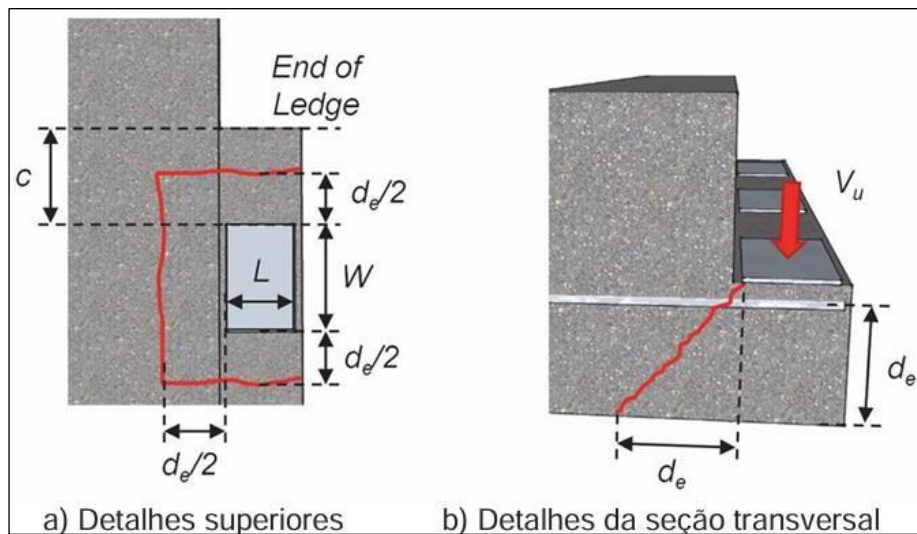
Fonte: Garber *et. al* (2017)

A representação desses mecanismos evidencia que a concentração de carregamentos em regiões localizadas das mesas pode produzir diferentes formas de ruptura, cuja ocorrência depende das características específicas de cada situação estrutural. Entre esses mecanismos, a punção apresenta particular importância para esta pesquisa, uma vez que está diretamente relacionada à atuação de carregamentos concentrados em áreas relativamente pequenas da mesa.

2.3 Punção em estruturas de concreto armado

A ruptura por punção caracteriza-se pela formação de uma superfície crítica ao redor da área carregada, resultando no destacamento de um cone de concreto. A representação esquemática desse mecanismo de ruptura é apresentada na Figura 4. Segundo Ferreira (2010), esse fenômeno ocorre principalmente em áreas submetidas a cargas concentradas ou reações de apoio, promovendo o desenvolvimento de superfícies inclinadas de ruptura ao redor da região carregada.

Figura 4 – Projeto para cisalhamento de punção (baseado nas especificações de projeto de pontes AASHTO LRFD)



Fonte: Garber *et. al* (2017)

De acordo com Muttoni (2008), a ruptura por punção é considerada um dos mecanismos mais críticos em estruturas de concreto armado devido ao seu comportamento frágil e à baixa capacidade de redistribuição de esforços antes do colapso. Diferentemente das rupturas por flexão, esse tipo de falha pode ocorrer de maneira brusca, comprometendo significativamente a segurança estrutural.

Segundo a ABNT NBR 6118 (2023), a resistência à punção depende de fatores como resistência do concreto, espessura da peça, geometria do elemento e taxa de armadura existente. Além disso, a presença de armaduras capazes de auxiliar na absorção dos esforços cisalhantes pode contribuir para o aumento da capacidade resistente da estrutura.

Para Leonhardt e Mönnig (1977), o mecanismo resistente à punção está relacionado à formação de superfícies críticas inclinadas ao redor da área carregada, formando um cone ou tronco piramidal de ruptura. Esse comportamento ocorre devido à concentração de tensões cisalhantes próximas aos pontos de aplicação da carga.

Muttoni (2008) destaca ainda que as deformações desenvolvidas no elemento estrutural exercem influência significativa sobre a resistência à punção, principalmente em estruturas sem armadura transversal específica para cisalhamento. Dessa forma, fatores geométricos e deformacionais possuem papel importante na capacidade resistente da estrutura.

2.4 Punção em Mesas de Vigas T Invertidas

Em vigas “T” invertidas utilizadas como travessas de pontes, as mesas inferiores funcionam como regiões de apoio responsáveis pela transferência das cargas provenientes das longarinas. Segundo Garber et al. (2017), a aplicação dessas cargas em áreas relativamente pequenas pode gerar elevados estados de tensão localizados nas mesas, tornando essa região particularmente relevante para a avaliação do comportamento estrutural.

De acordo com a AASHTO LRFD (2020), a concentração de tensões nessas regiões pode provocar mecanismos de ruptura associados à punção, principalmente em situações envolvendo carregamentos próximos às extremidades da mesa ou regiões em balanço. Nessas condições, podem ser desenvolvidas superfícies críticas de ruptura, cuja configuração depende das características geométricas do elemento e da posição do carregamento aplicado.

Garber et al. (2017) afirmam que, além da punção, outros mecanismos resistentes também podem atuar nas vigas “T” invertidas, como o cisalhamento entre mesa e alma, a flexão local da mesa e os esforços desenvolvidos nas armaduras de suspensão. Dessa forma, o comportamento estrutural dessas vigas apresenta diferentes possibilidades de ruptura, sendo necessário considerar as características da seção e as condições de carregamento na avaliação da resistência.

Os estudos de Mabrouk (2023) demonstraram que alterações na geometria, na posição dos carregamentos e na disposição das armaduras podem modificar o comportamento resistente das vigas de seção T invertida. Os resultados indicaram influência desses parâmetros na distribuição dos esforços e no desenvolvimento da fissuração, evidenciando que a capacidade resistente não depende exclusivamente da resistência do concreto. Assim, a configuração estrutural e o detalhamento das armaduras devem ser considerados conjuntamente na análise desses elementos.

Nafadi et al. (2018) também verificaram diferenças entre o comportamento experimental das mesas submetidas a carregamentos concentrados e as previsões fornecidas pelos procedimentos de cálculo utilizados na pesquisa. Nos modelos de menor vão, os autores observaram que o procedimento analisado poderia superestimar a capacidade resistente em determinadas condições. Além disso, foram identificadas diferenças entre as superfícies de ruptura observadas experimentalmente e aquelas consideradas nas hipóteses de cálculo.

Em modelos submetidos a maiores níveis de solicitação global, Nafadi et al. (2018) verificaram que o aumento das tensões de flexão e cisalhamento contribuiu para a redução da capacidade resistente à punção. Os autores também observaram influência da excentricidade do carregamento em relação à alma, enquanto a protensão apresentou efeito favorável sobre a

resistência. Esses resultados demonstram que o comportamento local da mesa pode ser influenciado pelas condições globais de solicitação do elemento.

Em conjunto, os estudos apresentados demonstram que o comportamento à punção das mesas submetidas a carregamentos concentrados está relacionado à interação entre geometria, condições de carregamento, solicitações globais e detalhamento das armaduras. As pesquisas também evidenciam que algumas hipóteses adotadas nos procedimentos de cálculo podem apresentar diferenças em relação ao comportamento observado experimentalmente. Esses resultados reforçam a necessidade de avaliar criteriosamente os modelos utilizados para estimar a resistência das mesas de vigas T invertidas.

A partir dos resultados apresentados na literatura, verifica-se que a avaliação da resistência das mesas de vigas T invertidas exige a consideração dos diferentes mecanismos associados à transferência dos esforços e à possibilidade de ruptura por punção. Nesse contexto, torna-se necessário analisar os critérios estabelecidos pelas normas e especificações de projeto, verificando as hipóteses utilizadas para estimar a capacidade resistente desses elementos.

2.5 Recomendações Normativas

No Brasil, a ABNT NBR 6118 (2023) estabelece os critérios gerais para análise e dimensionamento de estruturas de concreto armado e protendido. Segundo a norma, as verificações relacionadas à punção concentram-se principalmente em lajes e fundações, considerando parâmetros associados à resistência do concreto, geometria da peça e presença de armaduras específicas.

Entretanto, de acordo com Garber et al. (2017), a norma brasileira não apresenta recomendações específicas voltadas ao dimensionamento de mesas de vigas “T” invertidas submetidas a carregamentos concentrados. Dessa forma, torna-se comum a utilização de normas internacionais para análise desse tipo de situação estrutural.

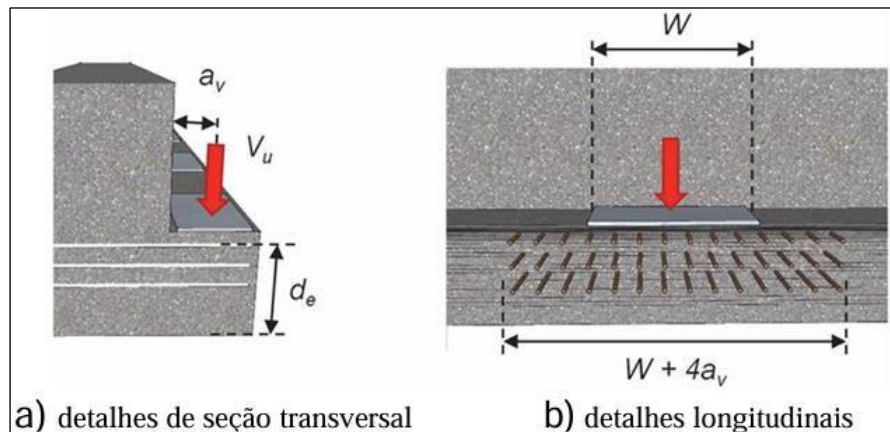
Entre as principais referências internacionais utilizadas destaca-se a AASHTO LRFD Bridge Design Specifications (2020), amplamente aplicada em projetos de pontes e viadutos. Segundo a norma, o comportamento resistente das vigas “T” invertidas deve ser avaliado considerando diferentes mecanismos de ruptura possíveis.

A AASHTO LRFD (2020) estabelece verificações relacionadas ao cisalhamento entre mesa e alma, punção na mesa, esforços de tração na alma, flexão local da mesa e esmagamento na região de apoio. Essas verificações buscam garantir condições adequadas de segurança estrutural frente às tensões desenvolvidas durante o funcionamento da estrutura.

2.5.1 Cisalhamento entre a mesa e a alma

O atrito de cisalhamento está relacionado ao deslizamento relativo entre duas partes de um elemento ao longo de um determinado plano, que pode corresponder a uma interface geométrica, a uma região submetida a elevadas tensões de cisalhamento ou a uma junta fria. No caso de uma viga do tipo IT, essa região de cisalhamento está localizada na interface entre a saliência e a alma do elemento, conforme apresentado na Figura 5.

Figura 5 – Projeto para atrito de cisalhamento (baseado nas especificações de projeto de pontes AASHTO LRFD)



Fonte: Garber *et. al* (2017)

Para a determinação da capacidade de atrito de cisalhamento, a Especificação de Projeto de Pontes AASHTO LRFD apresenta as expressões correspondentes às Equações (1) a (3), cujas variáveis são definidas na seção de notação do artigo.

$$V_{ni} = 2,76 \cdot d_e \cdot (W + 4 \cdot a_v) + 1,4 \cdot A_{vf} \cdot f_y \quad (\text{Equação 1})$$

$$V_{ni} \leq 0,25 \cdot f_c \cdot d_e \cdot (W + 4 \cdot a_v) \quad (\text{Equação 2})$$

$$V_{ni} \leq 10,34 \cdot d_e \cdot (W + 4 \cdot a_v) \quad (\text{Equação 3})$$

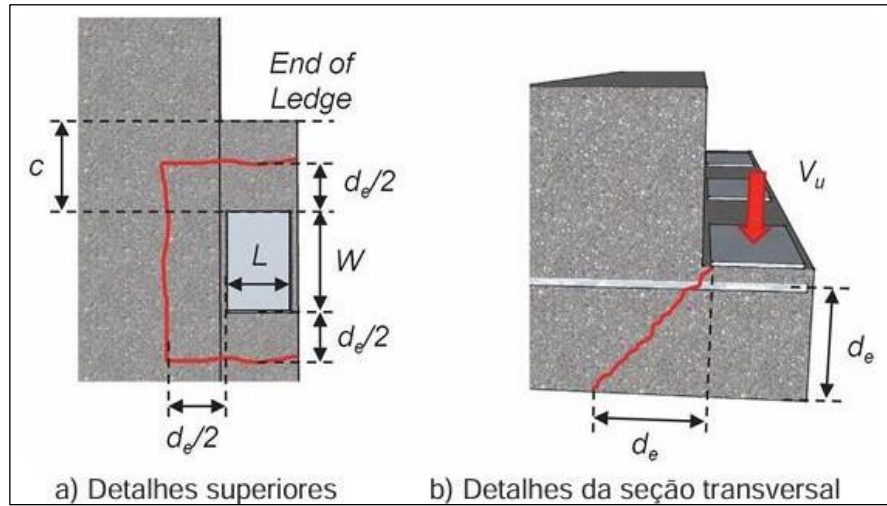
Para garantir a adequada transferência das cargas aplicadas na mesa para a alma da viga, a AASHTO LRFD (2020) recomenda a utilização de armaduras de suspensão, especialmente nas regiões em que ocorre a introdução concentrada dos esforços. Essas armaduras contribuem para a transferência das forças entre a mesa e a alma, reduzindo a concentração dos esforços na região de ligação entre esses componentes da seção.

2.5.2 Punção na mesa

A resistência ao cisalhamento por punção pode ser determinada considerando-se a superfície de ruptura formada ao redor do perímetro da placa de apoio responsável pela aplicação da carga, conforme ilustrado na Figura 6. A capacidade nominal associada a esse mecanismo pode

ser obtida por meio das Equações (1) a (6), cuja aplicação depende da posição da placa de apoio em relação ao elemento analisado.

Figura 6 – Dimensionamento ao cisalhamento por punção com base nas especificações da AASHTO LRFD para projetos de pontes



Fonte: Garber *et. al* (2017)

Essas formulações foram estabelecidas para representar a capacidade do cone de ruptura decorrente do cisalhamento por punção. Para apoios internos ou externos posicionados a uma distância suficiente da borda, utiliza-se a Equação (4) quando o valor de c é superior à metade do espaçamento interno entre as cargas, representado por S .

$$V_n = 0,33 \cdot \sqrt{f_c} \cdot (W + 2L + 2d_e) \cdot d_e \quad (\text{Equação 4})$$

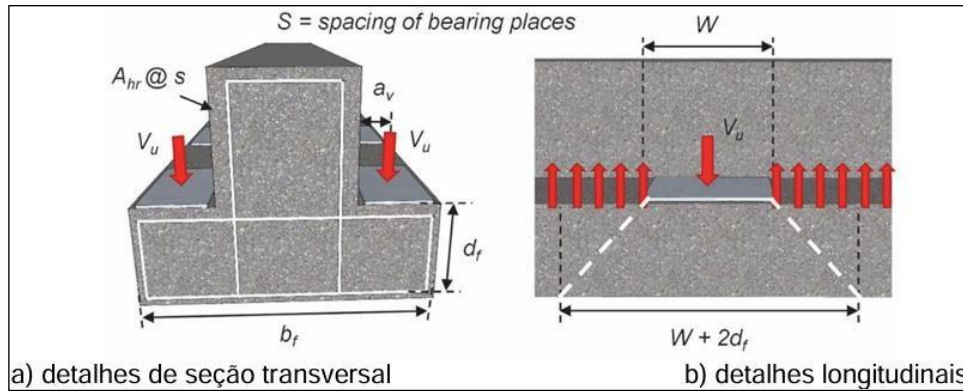
$$V_n = 0,33 \cdot \sqrt{f_c'} \cdot (W + L + d_e) \cdot d_e \quad (\text{Equação 5})$$

$$V_n = 0,33 \cdot \sqrt{f_c} \cdot (0,5W + L + d_e + c) \cdot d_e \quad (\text{Equação 6})$$

2.5.3 Esforços de tração na alma

É necessário prever armadura suficiente nos cabides para garantir a transferência dos esforços da saliência para a alma da viga. De acordo com as especificações vigentes da AASHTO LRFD para projetos de pontes, a armadura dos cabides deve ser disposta adicionalmente à menor quantidade de armadura transversal requerida em qualquer um dos lados da reação da viga apoiada. Os parâmetros utilizados nessas formulações são apresentados na Figura 7.

Figura 7 – Projeto para o reforço do pendurador



Fonte: Garber *et. al* (2017)

Dessa forma, a área de aço destinada a resistir ao cisalhamento na saliência da viga, representada por V_n nas Equações (7) e (8), deve ser considerada além da armadura necessária ao dimensionamento convencional ao cisalhamento. A Equação (7) permite estimar a resistência ao cisalhamento da saliência para o estado-limite de serviço, considerando a contribuição de uma perna da armadura do cabide, A_{hr} . Para o estado-limite de resistência, deve-se adotar o menor valor obtido entre as Equações (8) e (9).

$$V_n = \frac{A_{hr} \cdot (0,5 \cdot f_y)}{s} \cdot (W + 3 \cdot af) \quad (\text{Equação 7})$$

$$V_n = \frac{A_{hr} \cdot f_y}{s} \cdot S \quad (\text{Equação 8})$$

$$V_n = (0,063 \cdot \sqrt{f'_c} \cdot b \cdot d \cdot f) + \frac{A_{hr} \cdot f_y}{s} \cdot (W + 2 \cdot df) \quad (\text{Equação 9})$$

Onde:

S = espaçamento dos locais de suporte

A_{hr} = área de uma perna do reforço do pendurador em alívios de vigas e vigas em T invertida

S = espaçamento de centro a centro do apoio ao longo de um consolo de viga

s = espaçamento das barras de reforço do suporte

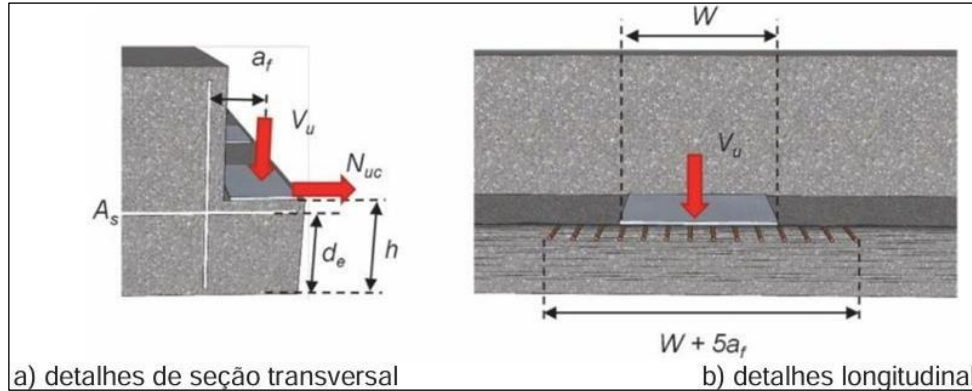
af = área da flange inferior inclinada (pol.²); área de uma flange de caixa incluindo reforços longitudinais da flange (pol.²); soma da área dos preenchimentos em ambos os lados de uma placa de conexão (pol.²); área da flange que transmite uma carga concentrada.

2.5.4 Flexão na mesa

Deve-se prever uma quantidade adequada de armadura na saliência para que sejam resistidas as forças de flexão e os esforços axiais atuantes nos elementos convencionais. Conforme apresentado na Figura 8, a parcela de armadura considerada na contribuição para a resistência à flexão e aos esforços axiais desses elementos corresponde ao menor valor entre $(W + 5af)$ e o

dobro da distância entre a borda do apoio e a extremidade da saliência, acrescido da largura do apoio, desde que não ocorra sobreposição entre essas regiões.

Figura 8 - Projeto para capacidade à flexão de saliência baseado nas Especificações da AASHTO LRFD



Fonte: Garber et. al (2017)

A resistência à flexão da mesa é determinada por meio da Equação (10).

$$M_R = A_{hr} \cdot f_y \cdot (d_e \cdot (\frac{0,5 \cdot A_{hr} \cdot f_y}{0,85 \cdot f_c \cdot b_w})) \quad (\text{Equação 10})$$

2.5.5 Esmagamento no aparelho de apoio

Outro estado limite considerado pela AASHTO LRFD (2020) está relacionado ao esmagamento do concreto e devem ser verificadas a área de apoio e a resistência do concreto, de modo a assegurar que a região de aplicação da carga apresente capacidade resistente suficiente. As áreas consideradas nos cálculos são apresentadas na Figura 9.

Figura 9 – Demonstração do cálculo das áreas A1 e A2



Fonte: Santos et. al (2026)

Essa verificação é realizada por meio das Equações (11) e (12), nas quais (m) corresponde a um fator de modificação que considera situações em que a área de apoio pode ser inferior à superfície de suporte.

$$P_n = 0,85 \cdot f_c \cdot A_1 \cdot m \quad (\text{Equação 11})$$

Onde:

A_1 = área sob o dispositivo de rolamento

$$m = \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \quad (\text{Equação 12})$$

Segundo Garber et al. (2017), as equações normativas propostas pela AASHTO apresentam resultados satisfatórios na previsão dos modos de ruptura em vigas “T” invertidas, embora alguns estudos apontem elevado nível de conservadorismo em determinadas situações experimentais. Além disso, Mabrouk (2023) destaca que diferenças relacionadas à geometria das vigas, posicionamento das cargas e detalhamento das armaduras podem influenciar significativamente os resultados experimentais quando comparados às previsões normativas. Dessa forma, pesquisas experimentais continuam sendo fundamentais para avaliação e aprimoramento dos modelos utilizados em projetos estruturais.

3 METODOLOGIA

3.1. Classificação da pesquisa

O presente trabalho caracteriza-se como uma pesquisa experimental de natureza quantitativa, desenvolvida com o objetivo de analisar o comportamento estrutural à punção em mesas de vigas “T” invertidas de concreto armado submetidas a carregamentos pontuais.

Segundo Gil (2008), a pesquisa experimental caracteriza-se pela definição de um objeto de estudo, pela seleção das variáveis capazes de influenciá-lo e pelo estabelecimento de procedimentos de controle e observação dos efeitos produzidos sobre o objeto analisado. Nesse contexto, foram realizados ensaios laboratoriais em vigas de concreto armado com diferentes configurações de carregamento, permitindo avaliar o comportamento estrutural e os mecanismos de ruptura desenvolvidos durante os ensaios, conforme apresentado na Figura 10.

Figura 10 – Representação de um ensaio realizado em viga de concreto armado.



Fonte: Santos *et. al* (2026)

Além disso, a pesquisa possui caráter comparativo, uma vez que os resultados experimentais obtidos foram comparados com as recomendações previstas pela norma AASHTO LRFD (2020), utilizada como referência para análise dos modos de ruptura relacionados às mesas das vigas “T” invertidas.

3.3 Programa experimental

O programa experimental foi desenvolvido no Laboratório de Estruturas da Universidade Federal do Pará, Campus Tucuruí, utilizando modelos de vigas de concreto armado com seção transversal “T” invertida, submetidos à aplicação de carregamentos pontuais. A investigação foi estruturada de modo a avaliar o comportamento das mesas das vigas diante das solicitações concentradas, com atenção especial aos mecanismos associados à ruptura por punção.

Durante a realização dos ensaios, foram acompanhadas as principais características do comportamento estrutural das vigas, incluindo o desenvolvimento das primeiras fissuras, a evolução do padrão de fissuração, a capacidade de carga e o comportamento dos modelos até a ruptura. Após a conclusão de cada ensaio, foram ainda observadas as características das regiões rompidas, buscando identificar o mecanismo de falha predominante e relacioná-lo às condições de carregamento e apoio adotadas.

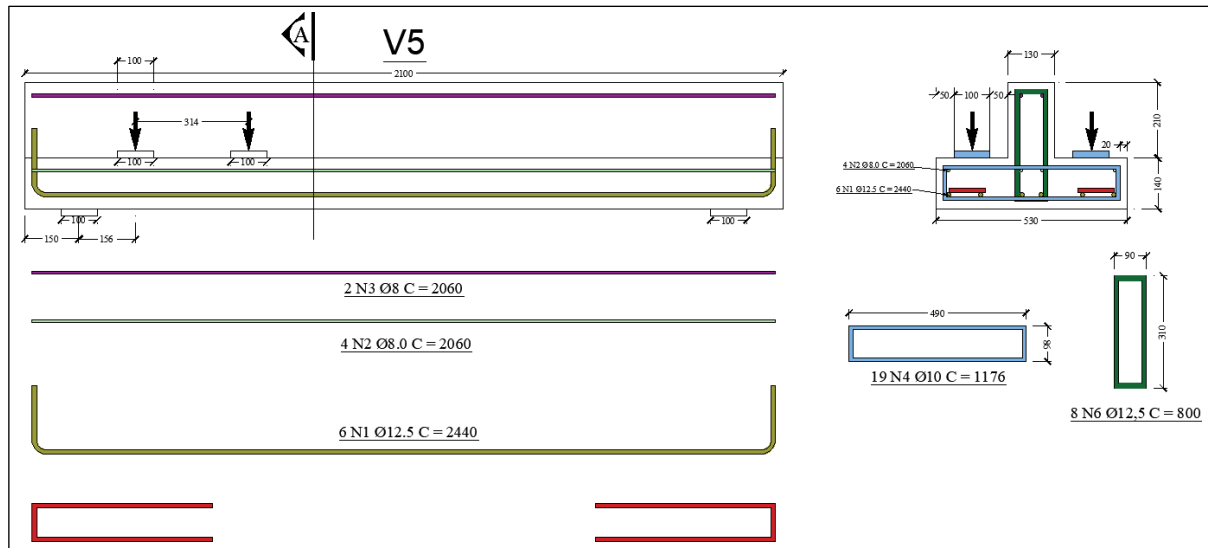
A avaliação dos resultados obtidos no programa experimental serviu como base para a comparação entre os modelos V5 e V7, correspondentes às vigas biapoiadas, e os modelos V1 e V3, correspondentes às vigas em balanço, permitindo analisar as diferenças de comportamento estrutural entre as configurações estudadas. Posteriormente, os resultados experimentais foram comparados com as previsões obtidas a partir das recomendações da AASHTO LRFD (2020), buscando avaliar a capacidade resistente à punção das mesas das vigas T invertidas.

3.4 Caracterização dos modelos experimentais

2.5.1 Vigas biapoiadas

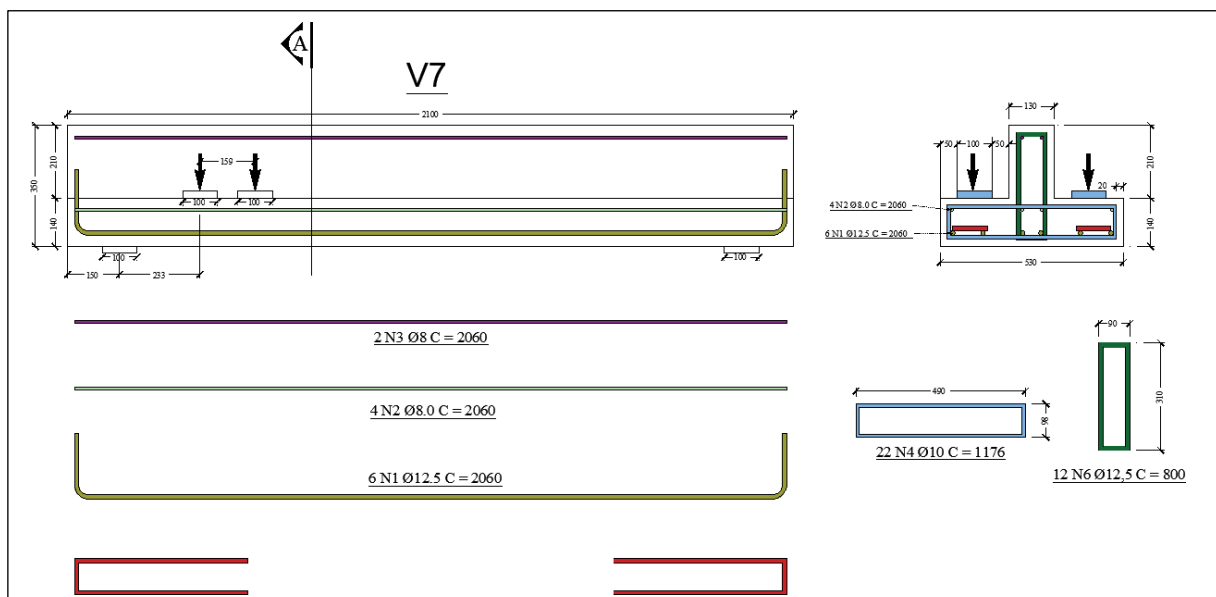
A primeira etapa experimental foi composta por duas vigas de concreto armado, denominadas V5 e V7, submetidas a carregamentos pontuais aplicados nas mesas inferiores da seção “T” invertida. As vigas apresentaram largura da mesa de 530 mm, altura da mesa de 140 mm, largura da alma de 130 mm, altura total de 350 mm e comprimento total de 2100 mm. O detalhamento geométrico e das armaduras das vigas biapoiadas é apresentado nas Figuras 11 e 12.

Figura 11 – Representação da geometria e armadura da viga V5



Fonte: Santos *et. al* (2026)

Figura 12 – Representação da geometria e armadura da V7



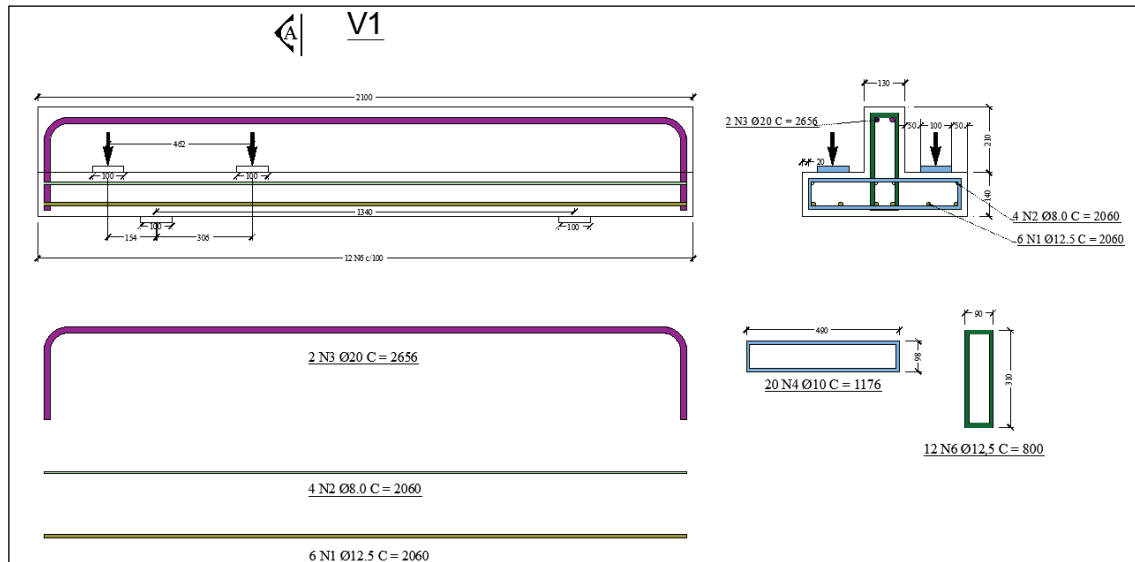
Fonte: Santos *et. al* (2026)

2.5.2 Vigas em balanço

A segunda etapa experimental foi composta por duas vigas em balanço, denominadas V1 e V3, submetidas a carregamentos pontuais aplicados nas mesas inferiores. As características geométricas das vigas foram mantidas semelhantes às da primeira campanha experimental, permitindo que as diferenças observadas nos resultados estivessem associadas predominantemente

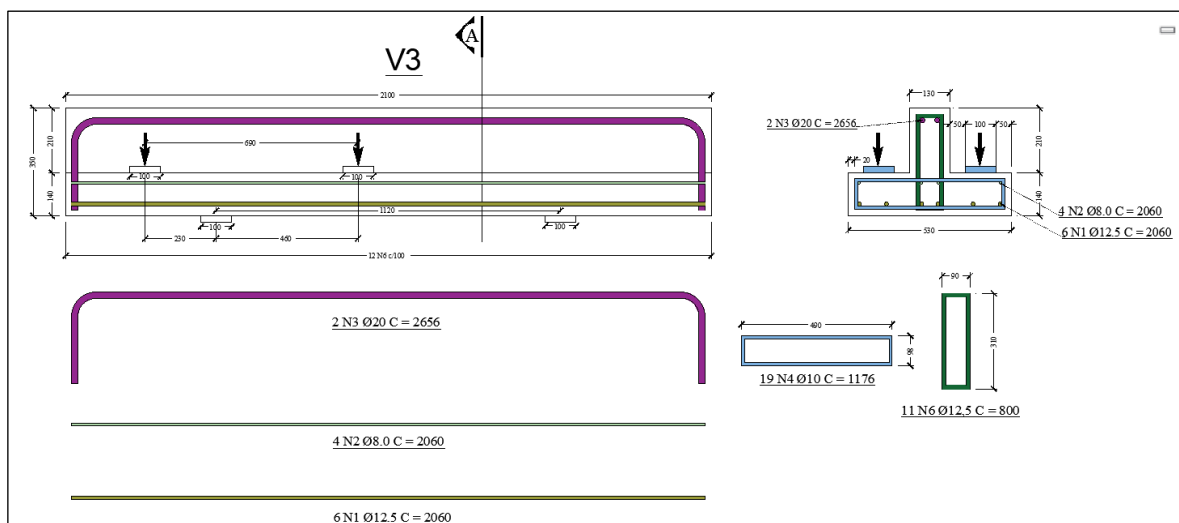
às condições de apoio adotadas. O detalhamento geométrico e das armaduras das vigas em balanço é apresentado nas Figuras 13 e 14.

Figura 13 – Representação da geometria e armação da viga V1



Fonte: Santos *et. al* (2026)

Figura 14 – Representação da geometria e armação da viga V3



Fonte: Santos *et. al* (2026)

3.5 Caracterização dos materiais

As propriedades mecânicas dos materiais empregados nos modelos experimentais desempenham papel fundamental na avaliação do comportamento estrutural de elementos de concreto armado submetidos à punção, uma vez que influenciam diretamente a capacidade resistente e os mecanismos de ruptura desenvolvidos durante os ensaios. Dessa forma, as

informações referentes ao concreto e ao aço utilizadas nesta pesquisa foram obtidas a partir dos estudos experimentais que constituem a base deste trabalho, sendo empregadas na interpretação dos resultados e na comparação com as previsões estabelecidas pela *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications* (2020).

Nos estudos experimentais utilizados como referência para esta pesquisa, o concreto empregado na confecção dos modelos foi dosado de modo a atender à resistência à compressão especificada em projeto, buscando garantir condições adequadas para a realização dos ensaios e a confiabilidade dos resultados obtidos. Durante a etapa de concretagem, foram também moldados corpos de prova cilíndricos destinados à caracterização da resistência à compressão do concreto.

A moldagem dos corpos de prova constituiu uma etapa importante para a determinação das propriedades mecânicas do concreto utilizado nos modelos experimentais. Foram moldados corpos de prova cilíndricos com diâmetro de 100 mm e altura de 200 mm, conforme as dimensões adotadas para os ensaios. A Figura 15 apresenta o procedimento de moldagem dos corpos de prova utilizados no estudo experimental, os quais posteriormente foram submetidos aos ensaios de resistência à compressão.

Figura 15 – Representação da moldagem dos corpos de prova cilíndricos



Fonte: Santos *et. al* (2026)

Após a moldagem, os corpos de prova foram destinados aos ensaios de resistência à compressão, realizados conforme os procedimentos estabelecidos pela ABNT NBR 5739:2018. Os valores obtidos nos ensaios foram utilizados para caracterizar mecanicamente o concreto empregado nos modelos e serviram como parâmetros para as análises comparativas desenvolvidas ao longo deste trabalho.

As armaduras dos modelos experimentais foram constituídas por barras de aço CA-50, com bitolas definidas de acordo com a função desempenhada e a configuração estrutural das vigas. Foram utilizadas barras de Ø16,0 mm, Ø12,5 mm, Ø10,0 mm e Ø8,0 mm, distribuídas entre armaduras longitudinais, armaduras construtivas e estribos. Nas vigas em balanço, a armadura longitudinal superior foi composta por barras de Ø16,0 mm, enquanto nas vigas biapoiadas foram empregadas barras de Ø8,0 mm nessa região. Em ambas as configurações, foram utilizadas barras de Ø12,5 mm na armadura inferior da mesa, barras de Ø8,0 mm como armadura construtiva e estribos com bitolas de Ø12,5 mm e Ø10,0 mm. A caracterização do aço contemplou a determinação da resistência ao escoamento, da resistência à tração e do módulo de elasticidade, conforme os procedimentos estabelecidos pela ABNT NBR 7480:2024.

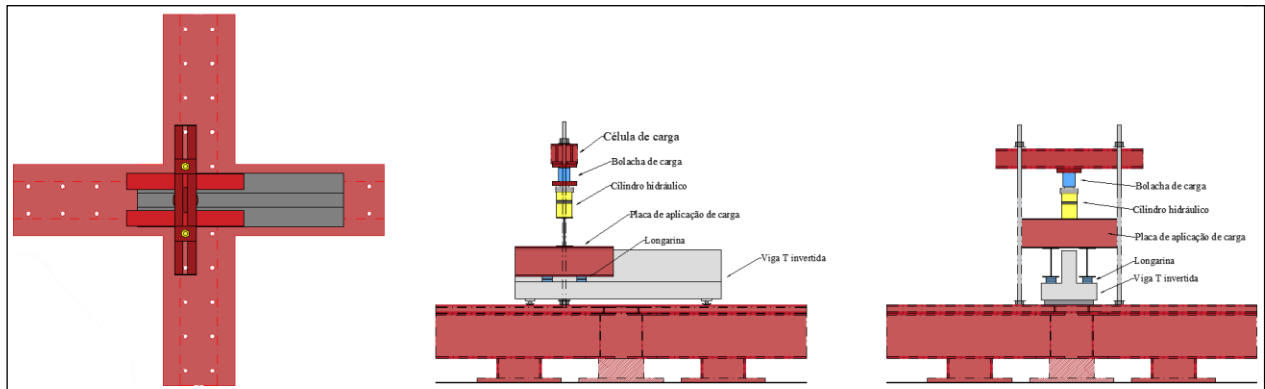
Os parâmetros mecânicos do concreto e do aço apresentados nos estudos experimentais constituíram a base para as análises desenvolvidas nesta pesquisa. A utilização desses dados possibilitou a comparação entre os diferentes modelos experimentais e contribuiu para uma avaliação mais consistente do comportamento estrutural das mesas de vigas T invertidas submetidas à punção, assegurando que as discussões realizadas estivessem fundamentadas em resultados experimentais previamente validados.

3.6 Sistema de ensaio

3.6.1 Vigas biapoiadas

Os ensaios das vigas biapoiadas foram realizados utilizando uma estrutura de reação composta por vigas metálicas e um sistema hidráulico destinado à aplicação dos carregamentos. O carregamento foi aplicado de forma gradual por meio de um cilindro hidráulico, permitindo o acompanhamento do comportamento dos modelos ao longo das etapas de carregamento. A aplicação progressiva das cargas possibilitou o monitoramento da resposta dos elementos experimentais durante os ensaios, considerando as condições de apoio e carregamento estabelecidas para as vigas biapoiadas. A configuração utilizada para a realização dos ensaios e a disposição dos principais componentes do sistema de aplicação de cargas são apresentadas na Figura 16.

Figura 16 – Sistema de ensaio das vigas biapoiadas

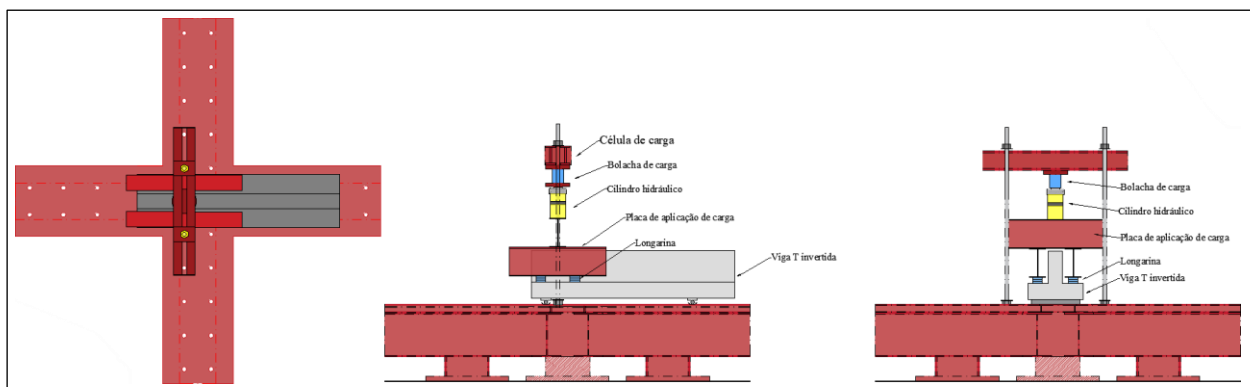


Fonte: Santos *et. al* (2026)

3.6.2 Vigas em balanço

Os ensaios das vigas em balanço seguiram procedimento semelhante ao adotado para as vigas biapoiadas, mantendo-se o sistema de aplicação gradual dos carregamentos e o acompanhamento da resposta dos modelos durante os ensaios. A principal diferença esteve relacionada às condições de apoio adotadas, que foram modificadas de modo a reproduzir o comportamento estrutural característico dos elementos em balanço. Essa configuração permitiu avaliar os modelos considerando uma condição de apoio distinta daquela empregada nas vigas biapoiadas, possibilitando a análise do comportamento estrutural sob diferentes condições de vinculação. A configuração do sistema utilizado nos ensaios das vigas em balanço, incluindo a disposição adotada para aplicação dos carregamentos, é apresentada na Figura 17.

Figura 17 – Sistema das vigas em balanço



Fonte: Santos *et. al* (2026)

3.7 Procedimento experimental

Inicialmente, os modelos experimentais foram posicionados nos respectivos sistemas de ensaio, de acordo com as condições de apoio estabelecidas para cada configuração estrutural

analisada. Essa etapa teve como finalidade garantir que os modelos apresentassem as condições de vinculação previstas para os ensaios, diferenciando as configurações das vigas biapoias e das vigas em balanço. Após o posicionamento e a verificação das condições de ensaio, os modelos foram submetidos à aplicação dos carregamentos de forma monotônica e incremental, mantendo-se o carregamento até que fosse atingida a ruptura do elemento experimental.

Durante a realização dos ensaios, foram acompanhadas as principais respostas apresentadas pelos modelos diante do aumento progressivo do carregamento. Entre os parâmetros observados estavam os valores de carga aplicados, o surgimento das primeiras fissuras, a evolução e os padrões de fissuração desenvolvidos ao longo do ensaio e a carga última resistente de cada viga. O acompanhamento desses aspectos permitiu relacionar o aumento das solicitações aplicadas às alterações observadas no comportamento dos modelos, contribuindo para a identificação das condições que antecederam a ruptura.

Após a ocorrência da ruptura, foram realizadas inspeções visuais nas superfícies dos modelos ensaiados, com atenção especial às regiões que apresentaram maior concentração de fissuras e danos. A observação das superfícies fissuradas possibilitou a identificação dos padrões de ruptura desenvolvidos em cada modelo e a caracterização dos mecanismos de falha predominantes. Essas informações foram posteriormente consideradas na análise dos resultados experimentais, permitindo relacionar os valores de carga última obtidos com o comportamento observado durante os ensaios e com os mecanismos de ruptura identificados nos diferentes modelos.

3.8 Critérios para análise dos resultados experimentais

Os resultados experimentais foram avaliados considerando os principais aspectos observados durante os ensaios, incluindo as cargas aplicadas, o surgimento e a evolução das fissuras, os padrões de fissuração e os mecanismos de ruptura identificados nos modelos. A análise desses parâmetros permitiu relacionar o comportamento apresentado pelas vigas ao longo do carregamento com a capacidade resistente atingida no momento da ruptura. Dessa forma, buscou-se verificar as características da resposta estrutural dos modelos e identificar possíveis diferenças no comportamento das vigas submetidas às distintas condições de apoio e carregamento analisadas.

A comparação entre os modelos experimentais foi realizada considerando as características geométricas, as condições de apoio, a configuração das armaduras e os valores de carga última resistente apresentados nos estudos utilizados como base para esta pesquisa. Esses aspectos foram considerados em conjunto para possibilitar uma avaliação do comportamento estrutural das mesas

das vigas T invertidas e da influência das diferentes configurações experimentais sobre os mecanismos de ruptura observados. A integração dos resultados dos dois estudos permitiu, assim, estabelecer uma análise comparativa entre as respostas apresentadas pelas vigas biapoiadas e pelas vigas em balanço.

Além da comparação dos resultados experimentais, foram consideradas as previsões obtidas por meio das recomendações da *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications* (2020). Para isso, os parâmetros necessários às verificações foram obtidos a partir das características dos modelos experimentais e dos dados apresentados nos estudos analisados. Os valores calculados segundo as recomendações normativas foram então confrontados com as cargas últimas determinadas experimentalmente, permitindo avaliar a proximidade entre os resultados e identificar possíveis diferenças entre a capacidade resistente observada nos ensaios e aquela estimada pelo procedimento normativo.

A comparação entre os valores experimentais e normativos também foi utilizada para avaliar o nível de conservadorismo das expressões empregadas na estimativa da resistência à punção. Essa avaliação possibilitou verificar se as previsões normativas apresentaram valores inferiores, próximos ou superiores aos resultados obtidos experimentalmente, contribuindo para a discussão sobre a aplicabilidade das recomendações da AASHTO LRFD (2020) às condições analisadas. Os resultados dessa comparação foram posteriormente utilizados na discussão do comportamento estrutural das mesas de vigas T invertidas e na avaliação conjunta dos dois programas experimentais.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização dos materiais

A caracterização mecânica dos materiais empregados na confecção dos modelos experimentais constituiu uma etapa indispensável para garantir a confiabilidade dos resultados obtidos durante os ensaios. Considerando que as duas campanhas experimentais foram executadas com materiais de mesmas propriedades mecânicas, optou-se por apresentar de forma unificada os resultados dos ensaios de caracterização do concreto e das armaduras, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Propriedades mecânicas dos materiais utilizados nos modelos experimentais

Material	f_{ys} (MPa)	ϵ_{ys} (‰)	E_s (GPa)	f_c (MPa)	f_{ct} (MPa)
$\emptyset$ 12,5 mm	667,87	3	215,11	-	-
$\emptyset$ 10,0 mm	403,83	2	202,71	-	-
$\emptyset$ 8,0 mm	404,48	2	208,83	-	-
Concreto	-	-	-	15,26	2,12

Fonte: Adaptado de Santos *et. al* (2026).

Observa-se que as barras de aço utilizadas apresentaram diferentes resistências ao escoamento em função de seus diâmetros, mantendo módulos de elasticidade próximos entre si. Em relação ao concreto, verificou-se resistência média à compressão de 15,26 MPa e resistência média à tração de 2,12 MPa, valores compatíveis com aqueles adotados para a execução dos modelos experimentais.

A uniformidade das propriedades mecânicas dos materiais foi importante para reduzir a influência de variáveis relacionadas à fabricação dos modelos, permitindo que as diferenças observadas durante os ensaios fossem atribuídas principalmente às condições de apoio e à configuração estrutural das vigas analisadas. Dessa forma, a comparação entre os resultados obtidos nas vigas biapoiadas e nas vigas em balanço foi realizada sob condições materiais equivalentes, conferindo maior consistência às análises desenvolvidas neste estudo.

4.2 Comportamento estrutural das vigas biapoiadas

As vigas biapoiadas (V5 e V7) foram submetidas a carregamentos pontuais aplicados nas mesas inferiores com o objetivo de avaliar o comportamento estrutural frente ao fenômeno da punção. Durante os ensaios, buscou-se analisar a capacidade resistente dos modelos, os mecanismos de ruptura desenvolvidos e a compatibilidade dos resultados experimentais com as previsões fornecidas pela AASHTO LRFD (2020).

Os resultados obtidos para as vigas são apresentados na Tabela 2, destacando-se os aspectos relacionados ao comportamento estrutural observado durante cada ensaio.

Tabela 2 – Resultados experimentais das vigas biapoiadas

Viga	V_u (kN)	V_u/V_{teo}	Modo de ruptura
V5	91,0	1,18	Punção
V7	142,0	1,60	Punção

Fonte: Adaptado de Santos *et. al* (2026).

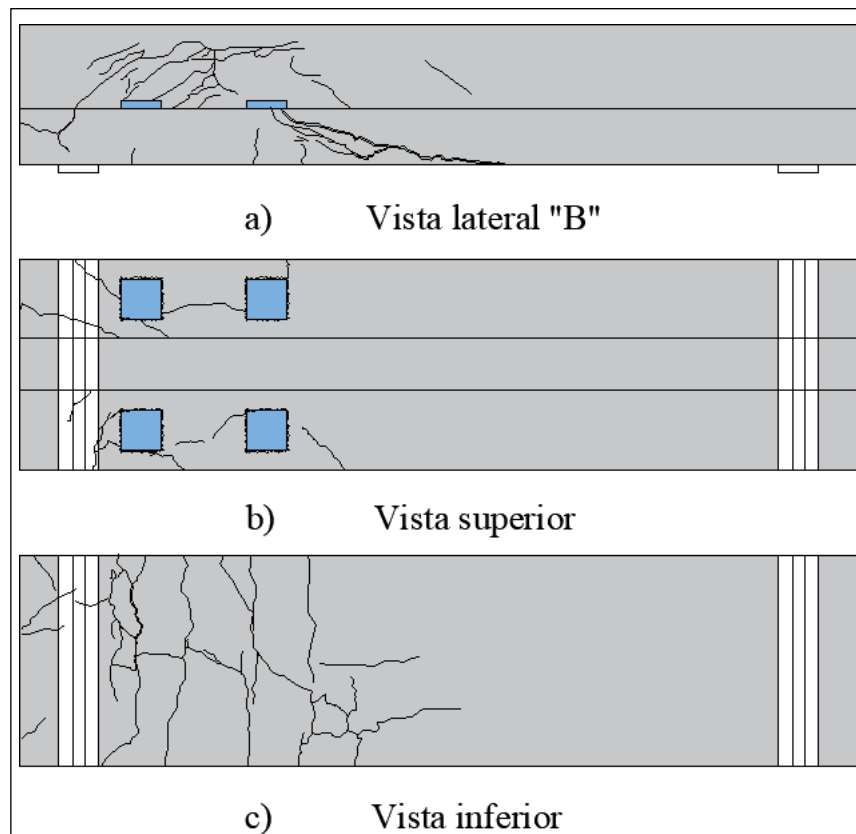
A partir dos resultados apresentados na Tabela 2, observa-se que ambas as vigas apresentaram ruptura por punção, confirmando que o dimensionamento das armaduras foi suficiente para impedir a ocorrência de outros modos de falha, como a ruptura por flexão ou por cisalhamento na alma. Dessa forma, o comportamento estrutural observado concentrou-se na região da mesa inferior, conforme previsto para o programa experimental desenvolvido.

Em relação à capacidade resistente, verifica-se que a viga V7 suportou uma carga última de 142,0 kN, enquanto a viga V5 apresentou ruptura sob uma carga de 91,0 kN. Apesar de possuírem a mesma configuração geométrica e serem confeccionadas com materiais de propriedades mecânicas equivalentes, os resultados evidenciam uma diferença significativa entre as cargas resistentes. Esse comportamento indica que fatores relacionados à posição de aplicação da carga e à distribuição interna das tensões influenciaram diretamente a resistência à punção das mesas das vigas.

Outro aspecto relevante refere-se à comparação entre os resultados experimentais e os valores estimados pela AASHTO LRFD (2020). As relações V_u/V_{teo} iguais a 1,18 para a V5 e 1,60 para a V7 demonstram que a norma apresentou comportamento conservador para ambos os modelos, uma vez que as cargas resistentes obtidas experimentalmente foram superiores às previstas teoricamente. Esse resultado reforça as observações apresentadas por Garber et al. (2017), que destacam a tendência conservadora das equações normativas quando aplicadas à análise da punção em mesas de vigas T invertidas.

Após a análise quantitativa dos resultados, torna-se importante avaliar o comportamento qualitativo das vigas por meio dos padrões de fissuração observados durante os ensaios. As Figuras 18 e 19 apresentam os mecanismos de ruptura desenvolvidos nas vigas V5 e V7, respectivamente.

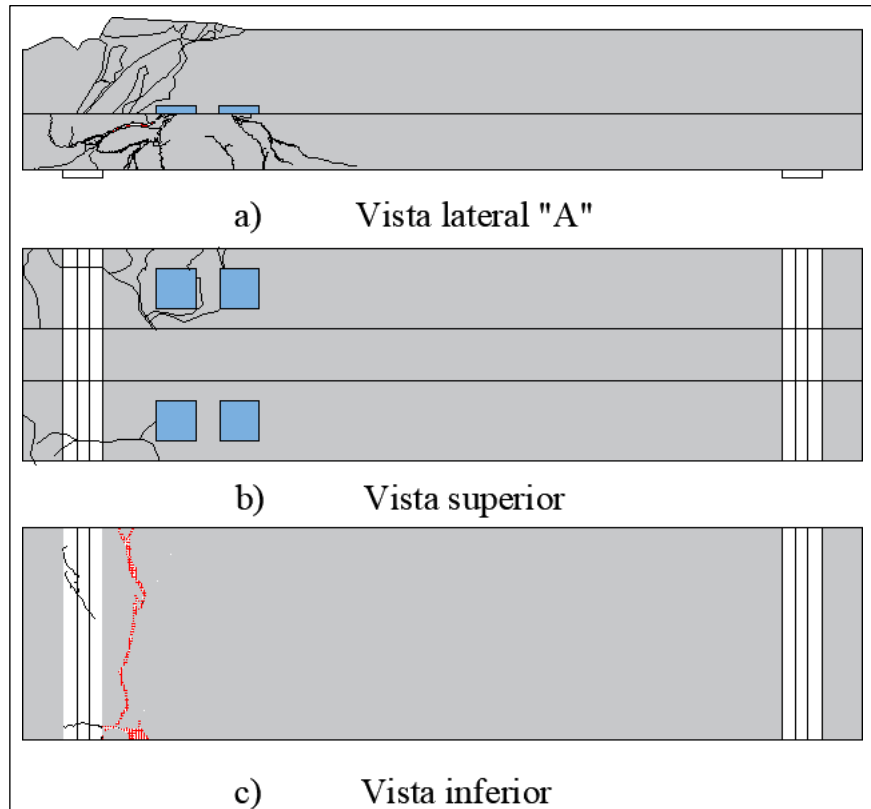
Figura 18 – Padrão de fissuração da V5



Fonte: Santos *et. al* (2026).

Observa-se na Figura 18 que as fissuras iniciaram na região inferior da mesa, próximas ao ponto de aplicação da carga, propagando-se de forma inclinada em direção à alma da viga. Esse comportamento evidencia a concentração das tensões de cisalhamento nas proximidades da área carregada, característica típica do mecanismo de ruptura por punção em elementos de concreto armado submetidos a carregamentos concentrados.

Figura 19 – Padrão de fissuração da viga V7



Fonte: Santos *et. al* (2026).

A Figura 19 evidencia que a viga V7 apresentou mecanismo de ruptura semelhante ao observado na V5, caracterizado pela formação de fissuras concentradas ao redor da região de aplicação da carga. Entretanto, nota-se uma distribuição mais uniforme das fissuras e uma superfície resistente mais desenvolvida, comportamento compatível com a maior carga última suportada por esse modelo experimental. A propagação das fissuras em direção à alma da viga confirma que o mecanismo resistente permaneceu governado pelo fenômeno da punção, corroborando os resultados quantitativos apresentados anteriormente.

De maneira geral, a análise conjunta dos resultados experimentais e dos padrões de fissuração demonstra que ambas as vigas apresentaram comportamento estrutural compatível com o esperado para mesas de vigas T invertidas submetidas a carregamentos pontuais. As diferenças observadas na capacidade resistente entre os modelos não alteraram o mecanismo predominante de ruptura, mas evidenciaram a influência das condições de carregamento sobre a distribuição das tensões e sobre a resistência final das vigas ensaiadas.

4.3 Comportamento estrutural das vigas em balanço

Com o objetivo de avaliar a influência das condições de apoio sobre o comportamento à punção em mesas de vigas "T" invertidas, foram ensaiados dois modelos em balanço, denominados V1 e V3. Assim como na primeira campanha experimental, os carregamentos foram aplicados de forma monotônica e crescente até a ocorrência da ruptura, sendo monitorados os mecanismos de fissuração, a capacidade resistente e os modos de falha desenvolvidos ao longo dos ensaios. Os resultados obtidos para as vigas em balanço são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Resultados experimentais das vigas em balanço

Viga	V_u (kN)	V_u/V_{teo}	Modo de ruptura
V1	104,2	1,4	Punção
V3	105,0	1,4	Punção

Fonte: Adaptado de Santos *et. al* (2026).

A análise dos resultados apresentados na Tabela 3 demonstra que ambas as vigas em balanço apresentaram ruptura por punção, confirmando que esse foi o mecanismo resistente predominante durante os ensaios. Assim como observado nas vigas biapoiadas, não foram identificados modos de ruptura associados à flexão global ou ao cisalhamento da alma, indicando que o detalhamento das armaduras foi suficiente para direcionar a falha para a região da mesa, conforme previsto no planejamento experimental.

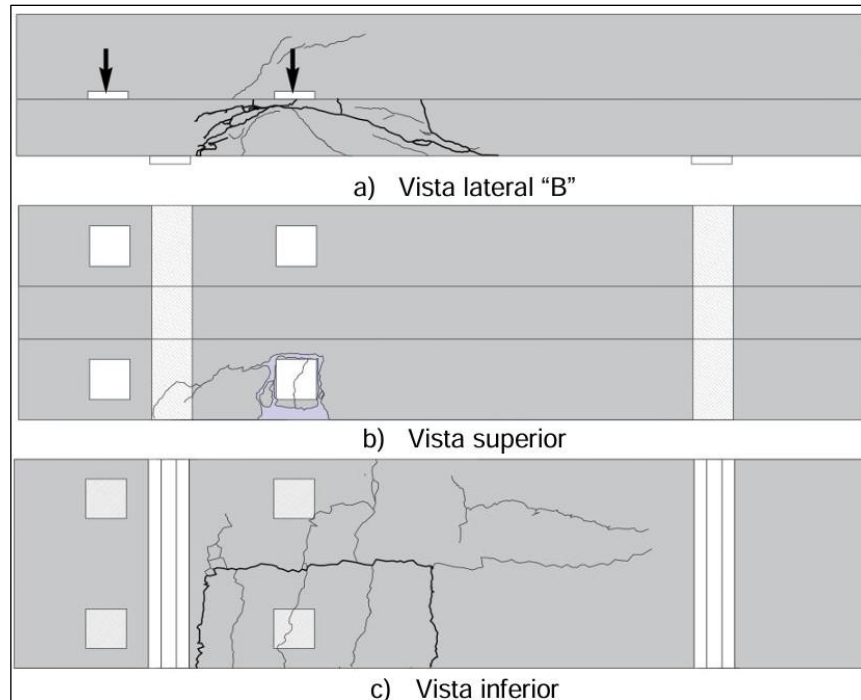
Comparando-se os modelos V1 e V3, observa-se que as cargas últimas experimentais apresentaram diferenças, evidenciando que pequenas variações na distribuição das tensões podem influenciar a capacidade resistente das mesas submetidas a carregamentos concentrados. Embora ambos os modelos possuíssem características geométricas semelhantes e fossem confeccionados com materiais de mesmas propriedades mecânicas, a resposta estrutural apresentou diferenças decorrentes das condições de carregamento e da redistribuição interna dos esforços.

A comparação entre os resultados experimentais e as previsões da AASHTO LRFD (2020) indica que as equações normativas também apresentaram comportamento conservador para as vigas em balanço. As cargas resistentes obtidas experimentalmente foram superiores às estimadas teoricamente, demonstrando que a norma foi capaz de prever adequadamente o mecanismo de ruptura, embora tenha subestimado a capacidade resistente dos modelos ensaiados.

Esse comportamento está em consonância com os resultados observados na campanha experimental das vigas biapoiadas, reforçando a tendência conservadora das recomendações normativas para esse tipo de elemento estrutural. Após a análise quantitativa, os padrões de

fissuração observados durante os ensaios permitem compreender de forma mais detalhada o comportamento estrutural das vigas em balanço. As Figuras 20 e 21 apresentam os mecanismos de ruptura desenvolvidos pelos modelos V1 e V3, respectivamente.

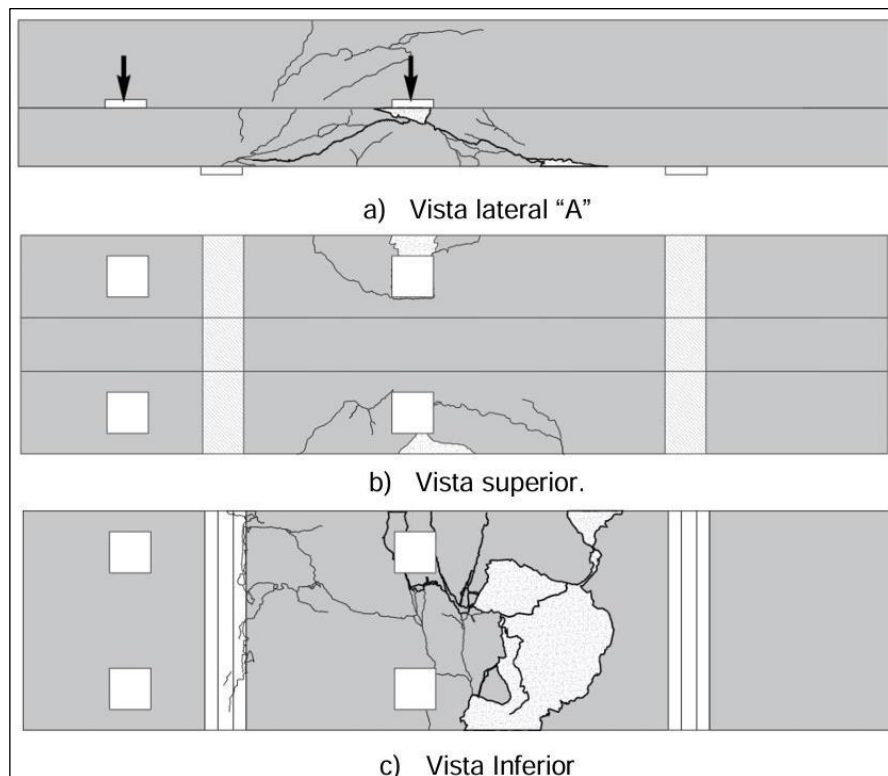
Figura 20 – Padrão de fissuração da V1



Fonte: Santos *et. al* (2026).

Observa-se na Figura 20 que as fissuras se concentraram ao redor da região de aplicação da carga, propagando-se em direção à alma da viga e formando uma superfície de ruptura característica do fenômeno da punção. A disposição das fissuras evidencia a elevada concentração de tensões cisalhantes na mesa inferior, comportamento compatível com o mecanismo resistente esperado para esse tipo de estrutura.

Figura 21 – Padrão de fissuração da V3



Fonte: Santos *et. al* (2026).

A Figura 21 demonstra que a viga V3 apresentou padrão de fissuração semelhante ao observado na V1, caracterizado pelo desenvolvimento de fissuras inclinadas e radiais na região próxima ao carregamento. Apesar da semelhança entre os mecanismos de ruptura, observa-se uma distribuição distinta das fissuras, indicando que a propagação das tensões ocorreu de forma diferenciada ao longo da mesa da viga. Ainda assim, a ruptura permaneceu governada pelo fenômeno da punção, corroborando os resultados experimentais apresentados anteriormente.

Os ensaios realizados nas vigas em balanço demonstraram comportamento estrutural compatível com o esperado para mesas de vigas "T" invertidas submetidas a carregamentos pontuais. Os resultados confirmam que as condições de apoio influenciam a distribuição dos esforços e a capacidade resistente dos modelos, sem alterar o mecanismo predominante de ruptura.

4.4 Análise comparativa do comportamento estrutural dos modelos experimentais

Após a avaliação individual das vigas biapoiadas e das vigas em balanço, torna-se possível realizar uma análise conjunta dos resultados obtidos ao longo do programa experimental. Essa comparação permite compreender de forma mais abrangente a influência das condições de apoio sobre o comportamento à punção em mesas de vigas "T" invertidas, bem como avaliar a consistência dos mecanismos resistentes observados em todos os modelos ensaiados.

Para facilitar essa análise, os principais resultados experimentais e as previsões obtidas por meio da AASHTO LRFD (2020) foram reunidos na Tabela 4.

Tabela 4 – Comparação geral entre os modelos experimentais

Viga	V_u (kN)	V_u/V_{teo}	Modo de ruptura
V5	91,0	1,18	Punção
V7	142,0	1,60	Punção
V1	104,2	1,4	Punção
V3	105,0	1,4	Punção

Fonte: Adaptado de Santos *et. al* (2026).

Observa-se, inicialmente, que todos os modelos experimentais apresentaram ruptura por punção, independentemente da condição de apoio adotada. Esse resultado demonstra que o dimensionamento das armaduras e a configuração geométrica das vigas foram adequados para direcionar o mecanismo resistente para a região da mesa inferior, evitando a ocorrência de modos de falha relacionados à flexão global ou ao cisalhamento da alma.

Outro aspecto relevante refere-se à influência das condições de apoio sobre a capacidade resistente das vigas. Embora os modelos tenham sido confeccionados com materiais de mesmas propriedades mecânicas e apresentassem geometrias semelhantes, verificaram-se diferenças nos valores das cargas últimas experimentais. Esse comportamento evidencia que a redistribuição dos esforços internos promovida pelas diferentes condições de apoio interfere diretamente na concentração das tensões próximas ao ponto de aplicação da carga, influenciando a resistência à punção.

Ao comparar os resultados experimentais com as previsões fornecidas pela AASHTO LRFD (2020), observa-se que a norma apresentou comportamento conservador para todos os modelos analisados. Em todas as vigas, as cargas resistentes obtidas experimentalmente foram superiores às estimadas pelas equações normativas, indicando que o procedimento de dimensionamento fornece previsões seguras para esse tipo de elemento estrutural. Entretanto, nota-se que o grau de conservadorismo variou entre os modelos, sugerindo que as condições de apoio e a forma de transferência dos esforços exercem influência significativa na precisão das estimativas normativas.

Além dos resultados quantitativos, a análise dos padrões de fissuração observados ao longo dos ensaios evidencia comportamento semelhante entre as vigas biapoiadas e as vigas em balanço. Em todos os modelos, as fissuras iniciaram na região inferior da mesa, próximas ao ponto de aplicação da carga, propagando-se gradualmente em direção à alma das vigas. Esse

comportamento confirma que o mecanismo resistente permaneceu governado pela concentração das tensões de cisalhamento características do fenômeno da punção.

Apesar das semelhanças observadas quanto ao mecanismo de ruptura, verificou-se que as vigas em balanço apresentaram distribuição das fissuras distinta daquela observada nas vigas biapoiadas. Essa diferença está relacionada às condições de contorno impostas durante os ensaios, que modificam o fluxo interno das tensões e influenciam a propagação das fissuras ao longo da mesa da viga. Consequentemente, a configuração estrutural mostrou-se um fator relevante para o comportamento resistente dos modelos analisados.

5 CONCLUSÃO

A análise do comportamento estrutural à punção em mesas de vigas T invertidas de concreto armado submetidas a carregamentos pontuais permitiu compreender a influência das diferentes configurações estruturais na resistência desses elementos. A integração dos resultados obtidos nas campanhas experimentais envolvendo vigas biapoiadas e vigas em balanço possibilitou uma avaliação conjunta do desempenho dos modelos, permitindo comparar seus mecanismos resistentes e confrontar os resultados experimentais com as previsões da AASHTO LRFD.

Os ensaios demonstraram que a ruptura por punção foi o modo de falha predominante em todos os modelos analisados. O desenvolvimento das fissuras ocorreu nas proximidades da região de aplicação da carga, evoluindo até a formação da superfície de ruptura, comportamento compatível com o descrito na literatura para elementos submetidos a carregamentos concentrados.

A comparação entre os modelos evidenciou que a configuração estrutural influenciou a capacidade resistente e a distribuição das fissuras, embora o mecanismo de ruptura tenha permanecido semelhante em todos os ensaios. Os resultados também indicaram que as previsões da AASHTO LRFD apresentaram comportamento conservador, uma vez que as cargas resistentes obtidas experimentalmente foram superiores às estimadas pela norma para todos os modelos avaliados.

A consolidação dos resultados provenientes das duas campanhas experimentais permitiu reunir informações anteriormente analisadas de forma independente, proporcionando uma avaliação mais abrangente do comportamento à punção em mesas de vigas T invertidas. Essa abordagem possibilitou comparar diretamente os modelos estudados e identificar tendências de comportamento relacionadas às diferentes configurações estruturais.

Dessa forma, considera-se que os objetivos propostos para a pesquisa foram alcançados, uma vez que foi possível analisar o comportamento estrutural dos modelos experimentais, identificar os mecanismos predominantes de ruptura, avaliar a influência da configuração estrutural na resistência à punção e comparar os resultados experimentais com as previsões da AASHTO LRFD. Os resultados obtidos reforçam a importância dos estudos experimentais para a compreensão desse fenômeno e fornecem subsídios que podem contribuir para o aperfeiçoamento das análises e do dimensionamento de mesas de vigas T invertidas de concreto armado.

REFERÊNCIAS

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications*. 9. ed. Washington, DC: AASHTO, 2020.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19) and Commentary*. Farmington Hills, MI: ACI, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7480: Aço destinado às armaduras para estruturas de concreto armado – Requisitos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

ATTA, A. M.; BEHIRY, R. N.; HARAZ, M. I. Effectiveness of external prestressing in enhancing the non-ductile hanger failure mechanism in reinforced concrete inverted T-beams. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, v. 18, n. 7, p. 1050-1065, 2024. DOI: 10.1007/s11709-024-1026-x.

BASTOS, P. S. S. *Fundamentos do concreto armado*. Bauru: Universidade Estadual Paulista, 2019.

CARVALHO, R. C.; FIGUEIREDO FILHO, J. R. *Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado*. 4. ed. São Carlos: EdUFSCar, 2014.

FERREIRA, M. P. **Punção em lajes lisas de concreto armado com armaduras de cisalhamento e momentos desbalanceados**. 2010. Tese (Doutorado em Estruturas e Construção Civil) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2010.

FUSCO, P. B. *Técnica de armar as estruturas de concreto*. São Paulo: PINI, 2013.

GARBER, D. B. Performance of ledges in inverted-T beams. *ACI Structural Journal*, Farmington Hills, v. 114, n. 2, p. 301-312, 2017.

GARBER, D. B.; VARNEY, N. L.; FERNÁNDEZ GÓMEZ, E.; BAYRAK, O. Performance of ledges in inverted-T beams. *ACI Structural Journal*, v. 114, n. 2, p. 487-498, mar./abr. 2017. DOI: 10.14359/51689451.

GIL, Antonio Carlos. *Como elaborar projetos de pesquisa*. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2008.

LEONHARDT, F.; MÖNNIG, E. *Construções de concreto: princípios básicos do dimensionamento de estruturas de concreto armado*. Rio de Janeiro: Interciência, 1978.

MABROUK, R. T. S. Shear behavior of reinforced concrete inverted-T deep beam. *Civil Engineering Journal*, v. 9, n. 5, p. 1180-1194, 2023.

MUTTONI, A. Punching shear strength of reinforced concrete slabs without transverse reinforcement. *ACI Structural Journal*, Farmington Hills, v. 106, n. 3, p. 440-450, 2009.

NAFADI, M. K.; KHALAFALLA, O. M.; LUCIER, G. W.; RIZKALLA, S.; ZIA, P.; KLEIN, G. J. Ledge behavior and strength of short-span L-shaped beams. *PCI Journal*, v. 63, n. 2, p. 67-84, mar./abr. 2018.

NAFADI, M. K.; LUCIER, G. W.; RIZKALLA, S.; ZIA, P.; KLEIN, G. J. Development of design guidelines for ledges of L-shaped beams. *PCI Journal*, v. 63, n. 2, p. 32-49, mar./abr. 2018.

NAFADI, M. K.; LUCIER, G. W.; RIZKALLA, S.; ZIA, P.; KLEIN, G. J. Ledge behavior and strength of long-span L-shaped beams. *PCI Journal*, v. 63, n. 2, p. 50-66, mar./abr. 2018.

SANTOS, M. L.; SILVA, J. S.; LEMOS, L. P.; MACIEL, R. S.; PEREIRA FILHO, M. J. M.; FERREIRA, M. P. Punção em mesas de vigas T invertidas de concreto armado submetidas a carregamentos pontuais em balanço. **Anais do 67º Congresso Brasileiro do Concreto – 67CBC2026**, 2026.