

*Revista Eletrônica*



*Volume 5 – Número 1 - 2025*

# Estudo de Ruptura em Pontes de Treliça

Rafael César Oliveira Pazianoto

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo

[pazianoto.cesar@aluno.ifsp.edu.br](mailto:pazianoto.cesar@aluno.ifsp.edu.br)

Raylson Rodrigues dos Santos

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo

[raylson.rodrigues@aluno.ifsp.edu.br](mailto:raylson.rodrigues@aluno.ifsp.edu.br)

## Resumo

O presente artigo analisa os principais mecanismos de falha em pontes treliçadas, integrando fundamentos de engenharia estrutural, mecânica dos materiais e análise numérica. Explica o comportamento das treliças (Howe, Pratt e Warren), a importância da redundância estrutural e os modos de falha por tração, compressão, flambagem e deficiência em ligações.

O trabalho compara dois estudos científicos — Walbridge & Nussbaumer (2008) e Chen et al. (2024) — para demonstrar como fadiga e ruptura súbita podem comprometer a integridade de pontes. Também revisa colapsos históricos, como o da Ponte I-35W (2007) e o da Ponte de Quebec (1907), destacando falhas de projeto e flambagem.

Na parte experimental, apresenta análises de esforços cisalhantes em conexões rebitadas e reforçadas, mostrando que o aumento da ductilidade e da robustez das ligações eleva a segurança global. Conclui apontando a necessidade de integração entre monitoramento, modelagem numérica e manutenção preditiva para prevenir falhas e prolongar a vida útil das pontes treliçadas.

## Palavras-chave

Pontes treliçadas; ruptura estrutural; fadiga; flambagem; colapso progressivo; conexões rebitadas; robustez estrutural; análise numérica; mecânica da fratura; engenharia estrutural.

## Abstract

The article presents a comprehensive analysis of the main failure mechanisms in truss bridges, integrating concepts from structural engineering, materials mechanics, and numerical modeling. It explains the behavior of classical truss types (Howe, Pratt, and Warren), emphasizing structural redundancy and the main modes of failure such as tension, compression, buckling, and joint deficiencies.

The work compares two scientific studies — Walbridge & Nussbaumer (2008) and Chen et al. (2024) — to illustrate how fatigue and sudden member rupture can compromise bridge integrity. It also revisits historical collapses, including the I-35W Bridge (2007) and the Quebec Bridge (1907), highlighting design errors and buckling failures.

In the experimental section, the article analyzes shear behavior in riveted and reinforced connections, showing that improved ductility and joint robustness significantly enhance overall safety. The study concludes by stressing the importance of integrating structural monitoring, numerical simulation, and predictive maintenance to prevent failures and extend the service life of truss bridges.

## Keywords

Truss bridges; structural failure; fatigue; buckling; progressive collapse; riveted connections; structural robustness; numerical analysis; fracture mechanics; structural engineering.

### 1 - Introdução

Pontes treliçadas são estruturas formadas por barras retilíneas conectadas em nós, que transferem esforços por triangulação e trabalham predominantemente à tração e à compressão. Essa configuração dá eficiência material e clareza ao caminho das cargas, mas também traz sensibilidade a modos específicos de ruptura — tanto nos membros quanto nas ligações. Em termos de segurança estrutural, falha é a perda de capacidade de um componente, ou de toda a estrutura, de suportar os carregamentos atuantes; pode manifestar-se de modo frágil (fratura) ou dúctil (escoamento).

Do ponto de vista sistêmico, a redundância tem papel decisivo. Em sistemas redundantes (hiperestáticos), a ruptura de um elemento não implica, por si só, o colapso global, pois há reserva de resistência e redistribuição de esforços; já em sistemas isostáticos (em série), a falha de um componente crítico pode desencadear o colapso da estrutura. Treliças isostáticas, em particular, podem colapsar quando uma barra sofre falha frágil sob grandes esforços de tração ou compressão — cenário típico de pontes em que a continuidade não fornece caminhos alternativos de carga.

Nesta revisão, “ruptura” é tratada com foco nos estados limites últimos (ELU), cobrindo: (I) tração (escoamento/ruptura da seção líquida); (II) compressão (esmagamento e instabilidade); (III) flambagem elástica, inelástica e local; e (IV) ligações (cisalhamento de parafusos, esmagamento em furos, arrancamento de bloco, resistência de soldas e de chapas-gusset). Os casos de colapso relatados para pontes com tabuleiros treliçados mostram que ligações deficientes e processos de corrosão/fadiga figuram entre os principais gatilhos de colapso progressivo — isto é, um dano localizado que evolui em cadeia até o colapso parcial ou total.

A análise do comportamento tensão-deformação fundamenta a compreensão desses modos de falha: o diagrama de engenharia (Figura 1) destaca limite de escoamento, limite de resistência e tensão de ruptura, essenciais para interpretar resultados experimentais e estimativas numéricas.

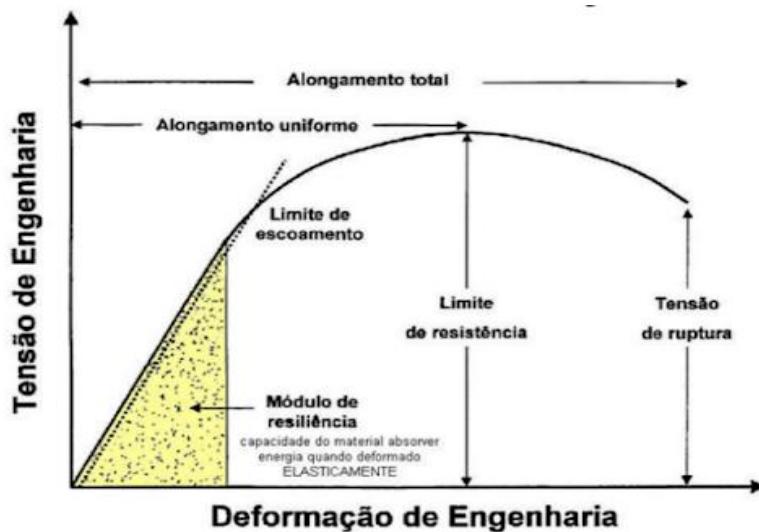


Figura 1 - Gráfico Tensão-Deformação

Em modelos de treliças tipo Warren, frequentemente empregados em vãos médios, as simulações e ensaios apontam concentração de tensões na região central sob carregamentos simétricos — um indicativo de onde a ruptura pode iniciar e, portanto, de onde o detalhamento e a inspeção devem ser mais rigorosos (Figura 2).

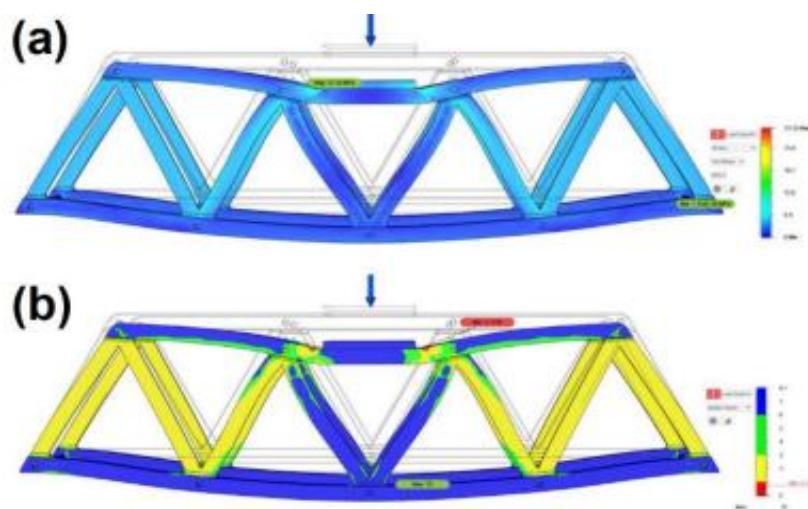


Figura 2 - Mapa de deslocamentos na treliça sob carga vertical central (seta).

A análise realizada no presente artigo articula resultados de ensaios de ruptura (tração, compressão e flambagem) e de estudos numérico-experimentais sobre treliças e módulos treliçados, destacando que, mesmo em soluções eficientes, ligações costumam governar o desempenho último — achado recorrente na literatura técnico-experimental.

O estudo realizado tem por objetivo consolidar a partir de múltiplas fontes experimentais e analíticas, critérios de resistência e verificação de ruptura aplicáveis a pontes de treliça, conectando evidências laboratoriais e em campo com as exigências normativas e boas práticas de projeto. Como resultado, propõe-se uma leitura integrada dos modos de falha por faixa de esbeltez, tipologia de treliça e condição de ligação, visando apoiar o estudo do limite de resistência e a tomada de decisão em projeto, reforço e gestão de risco. Casos reais de colapso e acidentes estruturais também são considerados para contextualizar consequências e priorizar medidas de prevenção e inspeção.

## 2 – Fundamentação Teórica

### 2.1 - Conceitos de Treliças

“Treliça é uma estrutura de elementos relativamente delgados ligados entre si pelas extremidades”, conforme a definição clássica de Hibbeler (2005, p. 220, apud Fuzaro, 2019). A essência estrutural está na geometria triangular: barras retilíneas (banzos, montantes e diagonais) conectadas em nós articulados formam módulos indeformáveis, o que confere rigidez geométrica com baixo consumo de material.

Quando as cargas são aplicadas aos nós e as ligações se aproximam de pinos (sem transmissão de momento), cada barra comporta-se, em primeira aproximação, como membro de duas forças, solicitada predominantemente por tração ou compressão. Esse arranjo explica a difusão das treliças em coberturas e pontes: a forma triangulada direciona os esforços de modo axial, reduzindo efeitos fletores e cisalhantes típicos de vigas maciças.

Sob carregamentos verticais usuais, o banzo superior tende à compressão e o banzo inferior à tração, enquanto diagonais e montantes fecham os painéis, redistribuindo as ações entre as barras.

A literatura técnica destaca justamente essa “axialização” das forças como razão da eficiência em vãos médios e longos: com membros articulados, as resultantes internas alinham-se ao eixo das barras, minimizando solicitações de flexão e permitindo alcançar maiores vãos com menor massa estrutural.

Em termos de concepção, tal economia decorre tanto da geometria (triângulos sucessivos) quanto do caminho de cargas aplicadas nos nós, as ações são transmitidas como forças axiais ao longo das barras da treliça e, por fim, são conduzidas aos apoios, onde se equilibram com as reações.

## 2.2 - Pontes e Caminho de Cargas

Uma ponte é um sistema estrutural cuja função é transferir ações (peso próprio, cargas móveis, vento etc.) à infraestrutura por meio de um caminho de cargas contínuo até as fundações. Em tabuleiros treliçados, o fluxo típico é: laje/longarinas → travessas → nós da treliça → barras (banzo superior/inferior e diagonais) → aparelhos de apoio → pilares/fundações. Essa cadeia de transmissão é essencial para entender onde nascem os esforços de tração e compressão em cada barra. A modelagem deve refletir esse fluxo, classificando a estrutura como isostática/hiperestática conforme a relação ( $r+b=2n$ ) (reações ( $r$ ), barras ( $b$ ), nós ( $n$ )) e resolvendo os esforços com equilíbrio dos nós, método de Ritter (seções) ou Cremona (gráfico de forças).

**Equilíbrio Global:**  $\Sigma F_x = 0$ ,  $\Sigma F_y = 0$ ,  $\Sigma M = 0 \rightarrow$  reações de apoio.

**Equilíbrio Local em Cada Nó:** duas equações ( $\Sigma F_x = 0$ ,  $\Sigma F_y = 0$ ) para achar os esforços normais ( $N_i$ ) nas barras (positivos em tração, negativos em compressão).

No pré-dimensionamento e na verificação, além do peso próprio e das ações permanentes, as combinações de ações incluem cargas móveis de tráfego (trem-tipo, multidão, frenagem) e efeitos dinâmicos/impactos verticais. Em estudos aplicados de pontes treliçadas modulares, esses itens estruturam a memória de cálculo, e os limites de serviço incluem, por exemplo, flecha máxima ( $\frac{L}{200}$ ) quando pertinente ao material, guiando as verificações nas aplicações práticas.

## 2.3 – Tipos de Treliças (Pratt, Howe e Warren)

Entre as diversas tipologias de treliças aplicadas a pontes, três arranjos clássicos estruturaram a maior parte das soluções desde o século XIX: Howe, Pratt e Warren. Seus nomes advêm dos projetistas que os difundiram e patentearam: William Howe (patente de 1840), Caleb e Thomas Willis Pratt (patente de 4 de abril de 1844) e James Warren em parceria com Willoughby T. Monzani (patente inglesa de meados do século XIX, com fontes mencionando 1848 e outras 1846). Além de fixarem marcos históricos, essas patentes registram escolhas geométricas que condicionam o caminho das forças e os modos prováveis de falha — aspectos centrais quando o foco é o limite de resistência.

**Treliça Howe:** Concebida por William Howe para explorar a combinação madeira + ferro típica do período ferroviário, essa treliça utiliza diagonais comprimidas (tradicionalmente de madeira) e montantes tracionados (barras/varões de ferro).

O arranjo mostrou-se particularmente adequado a vãos médios em estruturas de madeira, pois a tração concentrava-se nos varões metálicos ajustados por porcas, enquanto os elementos comprimidos de madeira exigiam atenção à flambagem — um traço que permanece como desvantagem intrínseca quando a geometria impõe esbeltez às diagonais. Com a difusão do aço, a Howe perdeu terreno em pontes metálicas justamente porque diagonais comprimidas tendem a demandar seções mais robustas para conter instabilidade.

**Treliça Pratt:** Desenvolvida por Caleb e Thomas W. Pratt, essa configuração inverte o papel dos elementos secundários: diagonais em tração e montantes em compressão sob cargas verticais usuais. A vantagem decisiva, sobretudo em estruturas metálicas, está em colocar os membros oblíquos (mais longos) trabalhando à tração, permitindo soluções mais esbeltas e leves; a compressão concentra-se nos montantes (mais curtos), reduzindo o risco de flambagem global.

A Pratt foi largamente empregada em pontes metálicas a partir da década de 1840 e atravessou o fim do século XIX pela eficiência e pela facilidade construtiva, embora suas “hip-verticais” próximas aos encontros possam exigir verificação particular. Como desvantagem, sob certos esquemas de cargas móveis podem ocorrer inversões de esforço em diagonais, demandando barras de contraventamento (counters) e detalhamento criterioso.

**Treliça Warren:** Proposta por James Warren e Willoughby T. Monzani, organiza a alma em triângulos (quase) equiláteros, sem montantes, de modo que as diagonais alternem tração e compressão de painel a painel.

A principal virtude é a distribuição relativamente uniforme de esforços quando a carga é mais espalhada (p.ex., carga distribuída do tabuleiro), com menos peças distintas do que arranjos com montantes, o que simplifica o traçado e a fabricação. Em contrapartida, sob cargas pontuais (concentradas em poucos nós) a Warren tende a concentrar solicitações nos membros vizinhos ao ponto de aplicação, podendo exigir reforços locais, e apresenta deflexões maiores em vãos longos se não houver rigidez suficiente.

Essas características explicam sua adoção recorrente em passarelas e vãos médios, bem como em modelos didáticos — inclusive o protótipo experimental deste estudo.

Em síntese comparativa, a Howe favorece soluções mistas históricas (madeira comprimida + tirantes metálicos), mas cobra cuidado com flambagem nas diagonais; a Pratt capitaliza a tração nas diagonais e reduz riscos de instabilidade, mostrando-se particularmente eficiente em estruturas metálicas; e a Warren distribui esforços de forma elegante quando o carregamento é uniforme, exigindo, porém, verificação criteriosa para cargas concentradas e flechas em vãos maiores.

A Figura 3 ilustra, para uma situação típica de carga vertical, a tendência de tração (vermelho), compressão (branco) e membros pouco solicitados/zero (preto) em cada tipologia, reforçando visualmente os caminhos de força discutidos e antecipando os pontos críticos a observar nos ensaios de ruptura.

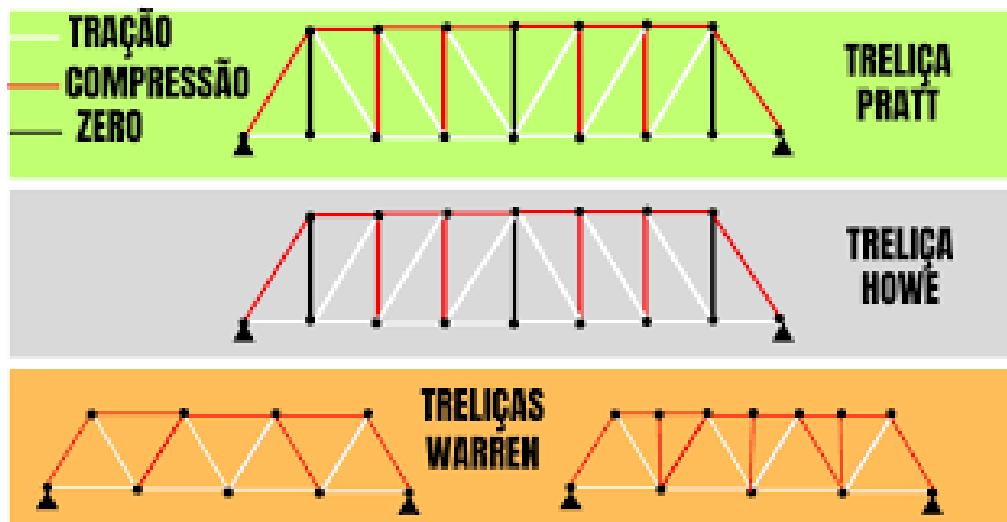


Figura 3 - Tipos de Treliças.

## 2.4 - Mecânica dos Materiais Aplicada (Tração, Compressão, Cisalhamento)

Para barras retilíneas com seção constante carregadas axialmente, valem as definições básicas:

**Tensão normal média:**  $\sigma = \frac{N}{A}$  (tração se  $N > 0$ , compressão se  $N < 0$ ).

**Deformação específica:**  $\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$ .

**Lei de Hooke (regime elástico):**  $\sigma = E \varepsilon$ , com  $E$  o módulo de elasticidade.

**Alongamento elástico:**  $\Delta L = \frac{NL}{AE}$  (definindo a rigidez axial  $EA$ ).

**Coeficiente de Poisson:**  $\nu = \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_l}$  (ordem  $0 < \nu < 0,5$  para materiais isotrópicos), importante para estados triaxiais e avaliação volumétrica de energia de deformação.

A curva  $\sigma - \varepsilon$  distingue limite elástico, limite de resistência e ruptura, além do comportamento dúctil versus frágil, utilizado nas verificações de ELU. Evidências experimentais em treliças mostram a

separação clara de regiões sob tração (banzo inferior) e compressão (banzo superior), com curvas carga–tensão e carga–deslocamento que calibram o modelo analítico.

**Energia de Deformação (Trabalho Elástico):** Para uma barra elástica com força axial crescente  $0 \rightarrow N$ :  $U = \int_0^{\Delta L} N_x dx = \frac{N \Delta L}{2} = \frac{N^2 L}{2AE}$  (útil para checar compatibilidade e para métodos energéticos).

**Critério de Dimensionamento Simples (Tensão Admissível):**  $\frac{N}{A} \leq \sigma_{adm} = \frac{\sigma_{max}}{\gamma}$ , onde  $\frac{\sigma_{max}}{\gamma}$  é um coeficiente de segurança (ligado a incertezas de cargas e materiais).

**Cisalhamento:** Nas barras ideais de treliça o cisalhamento é desprezível, mas ele governa as ligações (parafusos, rebites, soldas, chapas-gusset). Ainda que as barras sejam modeladas axialmente, o cisalhamento aparece com relevância nas ligações, sendo recorrente em rotas de colapso. Relatos de campo associam perda de eficiência do nó a corrosão e afrouxamento de elementos de ligação, com consequente redistribuição de esforços e aumento das tensões. Falhas locais por cisalhamento, esmagamento de furos e arrancamento de bloco são documentadas para pontes treliçadas antigas.

## 2.5 - Estabilidade de Barras (Flambagem)

Sob compressão, além do esmagamento, a barra pode perder estabilidade por flambagem. A formulação clássica para a flambagem elástica usa  $N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(KL)^2}$  (com  $K$  o fator de comprimento efetivo), enquanto a flambagem inelástica exige curvas de resistência e verificação além do regime linear. O regime é classificado pela esbeltez  $\lambda$  (função do comprimento efetivo  $K, L$  e da inércia/raio de geração), com fronteiras elástico–inelástico definidas pelos índices  $\lambda_r$  e  $\lambda_{pl}$  do material.

**Tensão Crítica Elástica (Euler):**  $\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E}{(\lambda)^2}$ .

**Comentário Prático:** em estruturas de treliça para construção de pontes, imperfeições geométricas e semi-rigidez dos nós reduzem significativamente a capacidade e alteram deslocamentos, devendo ser incorporadas na análise (p.ex., por rigidezes de mola de nó ou por análise não linear quando necessário).

## 2.6 - Modelagem e Cálculo de Esforços (Distribuição de Peso na Treliça)

A distribuição de cargas na treliça é obtida a partir do equilíbrio global do vão (para reações de apoio) e, em seguida, do equilíbrio de cada nó (método dos nós) ou de um recorte (método das seções/Ritter).

Esse procedimento é a base para determinar as forças axiais ( $N$ ) em cada barra a partir das componentes de equilíbrio locais, assumindo barras biarticuladas e carregamentos aplicados nos nós.

A literatura didática reúne esses métodos e ressalta que treliças podem ser isostáticas ou hiperestáticas conforme a contagem. Em termos operacionais:

Calcular reações (equilíbrio global).

Escolher um nó com duas incógnitas; aplicar  $\Sigma F_x = 0$ ,  $\Sigma F_y = 0$  para obter  $N_1, N_2$ .

Avançar nó a nó até fechar o sistema (ou usar Ritter para "cortar" o conjunto).

Alternativamente, usar Cremona: construir o polígono de forças e obter módulos e sinais (tração quando o vetor "foge" do nó; compressão quando "aponta" para o nó).

Deformações e flechas. As deformações axiais calculadas por  $\Delta L_i = \frac{N_i L_i}{A_i E_i}$  permitem estimar a flecha no vão (compatibilidade), bem como a energia elástica total ( $U = \sum \frac{N_i^2 L_i}{2 A_i E_i}$ ). Trabalhos com treliças modulares mostram coerência entre análises numéricas (por exemplo, via Ftool/MEF) e ensaios, inclusive com curvas de esforço normal e flecha no meio do vão, respeitando limites de serviço ( $\frac{L}{200}$ ) e verificações de tração/compressão e de ligações.

## 2.7 - Ligações e Cenários de Colapso

A literatura de acidentes com treliças mostra que muitos colapsos se iniciaram nas ligações (chapas/gussets, rebites/parafusos), por corrosão, perda de pré-aperto e subespessuras em placas de reforço, com evolução para colapso progressivo do tabuleiro. A análise de colapsos como o da I-35W (Minneapolis) e de treliças metálicas antigas no Brasil ilustra o mecanismo: deformação/fratura em nós críticos (U10, no caso americano) → aumento das compressões nas barras vizinhas → sequência de falhas.

**Caso Goiana-PE:** sobrecarga aliada a forte corrosão nas ligações desencadeou a sequência de falhas durante a passagem do caminhão.

**Reforços em Ligações Rebitadas:** substituição por parafusos de alta resistência é prática comum em reabilitação.

Do ponto de vista de confiabilidade do sistema, documentos técnicos discutem que sistemas redundantes (hiperestáticos) têm reserva de resistência e permitem redistribuição de esforços; já sistemas isostáticos podem colapsar quando o "elo mais fraco" falha. Para tabuleiros treliçados isostáticos, as barras mais comprimidas e zonas de ligação aparecem como zonas vulneráveis sujeitas a corrosão, fadiga e deficiências construtivas.

### 3 – Estudo Avançado do Rompimento em Pontes de Treliça

O colapso de pontes de treliça representa um campo de estudo crítico para a engenharia, onde a mecânica dos sólidos, a ciência dos materiais e a análise estrutural convergem. Do ponto de vista da engenharia mecânica, o rompimento não é um evento instantâneo, mas o culminar de processos de degradação que podem ser modelados, previstos e, em muitos casos, mitigados.

A análise de falhas em treliças transcende a simples verificação de sobrecarga estática, aprofundando-se em fenômenos complexos como a fadiga, a fratura, a flambagem e o colapso progressivo.

Dois estudos de caso recentes oferecem perspectivas complementares sobre esses mecanismos de falha, ilustrando a complexidade do problema e as diferentes abordagens analíticas necessárias para garantir a segurança e a robustez dessas estruturas essenciais.

#### 3.1 - Análise Comparativa de Estudos de Caso sobre Falha em Pontes de Treliça

Para aprofundar a compreensão dos mecanismos de rompimento, analisamos dois artigos científicos distintos: um focado na análise probabilística da fadiga em juntas soldadas e outro que investiga a robustez estrutural frente à ruptura súbita de um membro. A comparação entre eles revela a natureza multifacetada das falhas em pontes de treliça.

Tabela 1 – Comparaçāo entre artigos.

Característica	Estudo 1: Walbridge & Nussbaumer (2008) [1]	Estudo 2: Chen et al. (2024) [2]
Foco Principal	Análise de fadiga em juntas de treliças tubulares soldadas	Análise de robustez e colapso progressivo após a ruptura súbita de um membro.
Mecanismo de Falha	Propagação de trincas por fadiga devido a carregamentos cílicos (tráfego).	Falha em cadeia (colapso progressivo) iniciada pela remoção abrupta de um elemento estrutural.
Metodologia	Análise probabilística e mecânica da fratura para estimar a vida útil.	Simulação computacional (análise de elementos finitos) e monitoramento experimental em campo.
Tipo de Estrutura	Ponte de treliça tubular em serviço.	Ponte de treliça de aço em fase de construção.
Principal Conclusão	O tratamento pós-soldagem	A estrutura possui redundância para

	(punctionamento) aumenta significativamente a vida útil à fadiga, sendo mais eficaz quando aplicado após a incidência das cargas permanentes.	redistribuir cargas após uma falha inicial, mas a resposta dinâmica à ruptura súbita pode ser crítica e deve ser controlada.
Perspectiva da Eng. Mecânica	Foco na ciência dos materiais e na mecânica da fratura. A análise centra-se no comportamento microscópico do material junto às soldas, onde a concentração de tensão acelera o dano por fadiga.	Foco na dinâmica estrutural e na análise de sistemas. A análise avalia a resposta global da estrutura a um evento de falha localizado e a sua capacidade de encontrar caminhos de carga alternativos.

### 3.2 - Estudo 1: Ameaça Silenciosa da Fadiga e a Mecânica da Fratura

O trabalho de Walbridge e Nussbaumer [1] aborda um dos inimigos mais insidiosos das estruturas metálicas: a fadiga. Este fenômeno, responsável por uma vasta maioria das falhas em serviço de componentes mecânicos, ocorre devido a carregamentos cíclicos que, individualmente, não seriam suficientes para causar a falha do material.

Em pontes de treliça, o fluxo contínuo de tráfego gera esses ciclos de tensão, que levam à nucleação e propagação de trincas, especialmente em regiões de alta concentração de tensão, como as juntas soldadas.

#### 3.2.1 - Mecânica da Fratura Elástica Linear (LEFM)

Para analisar o comportamento dessas trincas, a engenharia mecânica utiliza a Mecânica da Fratura Elástica Linear (LEFM). A LEFM parte do princípio de que defeitos e trincas preexistem em todas as estruturas.

O parâmetro central desta teoria é o Fator de Intensidade de Tensão ( $K$ ), que quantifica a magnitude do campo de tensões na ponta de uma trinca. Existem três modos básicos de carregamento de uma trinca:

**Modo I (Abertura):** Resultante de tensões normais à face da trinca. É o modo mais comum e perigoso em pontes.

**Modo II (Cisalhamento no Plano):** Causado por forças de cisalhamento que atuam no plano da trinca.

**Modo III (Cisalhamento Fora do Plano):** Resultante de forças de cisalhamento que atuam paralelamente à frente da trinca.

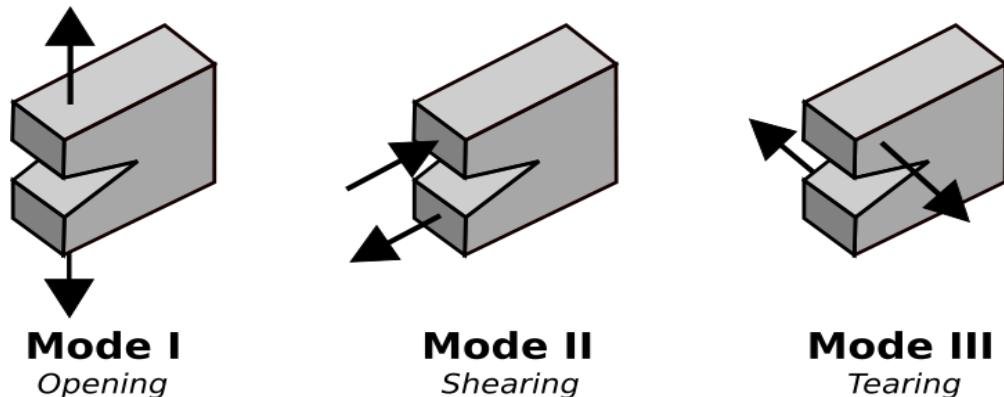


Figura 4 - Os três modos de carregamento de uma trinca: Modo I (abertura), Modo II (cisalhamento no plano) e Modo III (cisalhamento fora do plano).

A fratura ocorre quando o Fator de Intensidade de Tensão atinge um valor crítico, conhecido como Tenacidade à Fratura ( $K_{Ic}$ ), que é uma propriedade intrínseca do material. No Fator de Intensidade de Tensão  $\geq$  Tenacidade à Fratura, a trinca se propagará de forma instável, levando à fratura súbita do componente.

### 3.2.1.1 - Propagação de Trinca por Fadiga: A Lei de Paris

Em condições de fadiga, a trinca cresce um pouco a cada ciclo de carregamento, mesmo quando o Fator de Intensidade de Tensão é significativamente menor que Tenacidade à Fratura. A taxa de crescimento da trinca por ciclo (taxa de crescimento do comprimento de trinca por ciclo) é governada pela variação do fator de intensidade de tensão (Variação do Fator de Intensidade de Tensão = Fator de Intensidade de Tensão máximo - Fator de Intensidade de Tensão mínimo) e pode ser descrita pela Lei de Paris:  $\frac{da}{dN} = C * \Delta K^m$ .

Onde 'a' é o comprimento da trinca, 'N' é o número de ciclos, e 'C' e 'm' são constantes do material. Esta equação é a espinha dorsal da análise de vida útil à fadiga. Integrando- a, pode-se estimar o número de ciclos (e, portanto, o tempo de serviço) que uma estrutura pode suportar antes que uma trinca inicial atinja um tamanho crítico e cause a falha final.

O estudo de Walbridge e Nussbaumer [1] aplica esses conceitos de forma probabilística. Ele reconhece que tanto as cargas ( $\Delta K$ ) quanto a resistência do material ( $K_{Ic}$ , C, m) são variáveis. O tratamento de *needle peening* é eficaz porque introduz tensões residuais de compressão na superfície, o que reduz o valor efetivo de  $\Delta K$  para um dado ciclo de carregamento, diminuindo drasticamente a taxa de propagação da trinca ( $da/dN$ ) e, consequentemente, aumentando a vida útil da ponte.

### 3.3 - Estudo 2: O Efeito Dominó do Colapso Progressivo e a Dinâmica Estrutural

Em contraste com a degradação gradual por fadiga, o estudo de Chen et al. [2] aborda um cenário de falha de alta energia: a ruptura súbita de um membro estrutural. Este evento pode ser desencadeado por impacto, corrosão extrema, ou, como no caso analisado, uma falha durante a construção. A principal preocupação aqui é o colapso progressivo, um fenômeno em que a falha inicial de um componente leva a uma redistribuição de cargas que os elementos adjacentes não conseguem suportar, resultando em uma falha em cascata que pode comprometer a integridade de toda a estrutura.

#### 3.3.1 - Robustez, Redundância e Caminhos de Carga Alternativos (ALPs)

A capacidade de uma estrutura de resistir ao colapso progressivo é definida por sua robustez. Uma estrutura robusta é aquela que, mesmo sofrendo um dano localizado, consegue manter sua estabilidade geral.

A robustez está intrinsecamente ligada à redundância, que é a existência de múltiplos caminhos para que as cargas sejam transferidas para os apoios. Em treliças, a redundância é o que permite a formação de Caminhos de Carga Alternativos (ALPs) quando um membro falha.

O estudo de Chen et al. [2] utilizou simulações computacionais para verificar a existência e a eficácia desses ALPs. Ao remover virtualmente um membro, os engenheiros puderam observar como as forças internas se rearranjaram.

Os resultados positivos indicaram que a treliça possuía um grau de redundância, sendo capaz de redistribuir as cargas e evitar o colapso imediato.

#### 3.3.2 - O Fator de Amplificação Dinâmica (FAD)

No entanto, a análise não é tão simples quanto uma redistribuição estática. A ruptura de um membro é um evento súbito, que libera a energia de deformação elástica armazenada no componente de forma quase instantânea. Do ponto de vista da engenharia mecânica, isso transforma o problema de estático para dinâmico.

A carga não é simplesmente transferida; ela é "jogada" sobre os membros restantes, gerando um impacto.

Este efeito é quantificado pelo Fator de Amplificação Dinâmica (FAD), que é a razão entre a resposta dinâmica máxima da estrutura e a resposta que ela teria se a carga fosse aplicada estaticamente.

Para uma carga aplicada instantaneamente em um sistema elástico linear, o FAD pode chegar a um valor teórico de 2.0. Isso significa que a tensão nos membros que assumem a carga pode ser o dobro daquela que seria calculada em uma análise estática simples.

### 3.3.3 - Análise Não-Linear e o Método dos Elementos Finitos (MEF)

A análise de muitos mecanismos de falha, especialmente a flambagem e o colapso progressivo, exige ir além das suposições da análise linear. A engenharia mecânica moderna depende fortemente da Análise por Elementos Finitos (AEF ou MEF) para simular o comportamento não-linear de estruturas complexas. Existem dois tipos principais de não-linearidade que são cruciais para a análise de pontes de treliça:

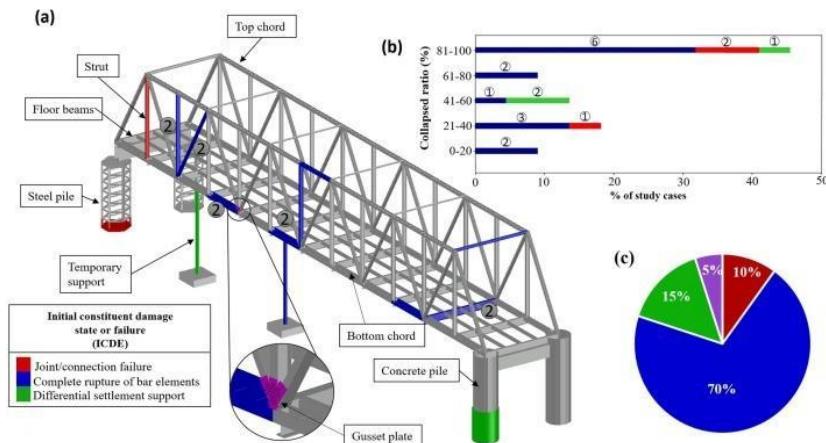


Figura 5 - Modelo computacional mostrando a análise de colapso progressivo em uma ponte de treliça.

A Não-Linearidade Geométrica ocorre quando as deformações da estrutura são grandes o suficiente para alterar significativamente sua geometria e, consequentemente, a forma como as cargas são suportadas. A flambagem é um exemplo clássico de não-linearidade geométrica. Não-Linearidade do Material: Ocorre quando o material da estrutura (neste caso, o aço) excede seu limite de escoamento e entra no regime plástico. A relação entre tensão e deformação deixa de ser linear (Lei de Hooke) e o material começa a sofrer deformações permanentes.

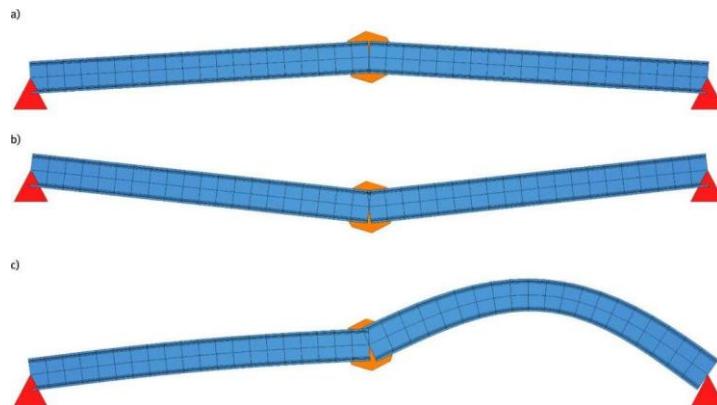


Figura 6 - Análise de flambagem não-linear utilizando o Método dos Elementos Finitos para determinar a carga crítica e o modo de colapso de uma ponte em arco treliçada.

O MEF é uma ferramenta numérica poderosa que divide a estrutura em uma malha de "elementos" menores, permitindo a resolução de complexas equações diferenciais que governam o comportamento não-linear. Para a análise de flambagem, por exemplo, o MEF pode ser usado para determinar as cargas críticas e os modos de flambagem de uma treliça, fornecendo uma visão muito mais precisa do que as fórmulas analíticas clássicas.

### 3.4 - Estudos de Caso Históricos: Lições Aprendidas com o Colapso

A teoria da engenharia é forjada no fogo da prática, e em nenhum lugar isso é mais verdadeiro do que na análise de falhas estruturais. O colapso de grandes pontes ao longo da história serviu como um catalisador brutal, mas necessário, para o avanço do conhecimento em projeto, análise e manutenção. Três casos são emblemáticos e oferecem lições cruciais sob a ótica da engenharia mecânica.

#### 3.4.1 - O Colapso da Ponte I-35W (Minneapolis, 2007): A Falha na Chapa de Ligação

O colapso da ponte I-35W sobre o rio Mississippi é um dos exemplos mais estudados de falha estrutural moderna. A investigação, conduzida pelo *National Transportation Safety Board (NTSB)*, concluiu que a causa primária foi a falha de uma chapa de ligação (*gusset plate*) no nó U10 da treliça principal. A análise revelou um erro de projeto chocante: as chapas naquele nó tinham apenas metade da espessura necessária (1/2 polegada em vez de 1 polegada) para suportar as cargas de serviço, um erro que permaneceu latente por 40 anos.

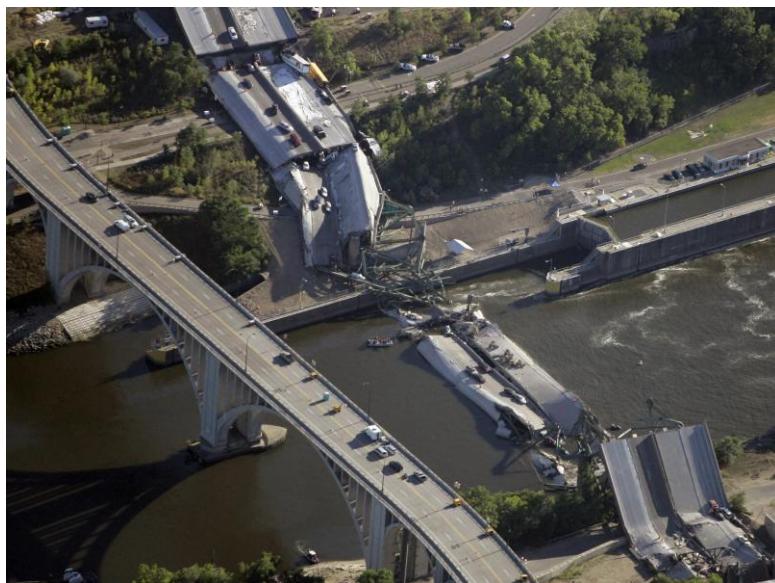


Figura 7 - Vista aérea do colapso da ponte I-35W em Minneapolis, 2007. A investigação apontou a falha em uma chapa de ligação subdimensionada como o gatilho para o colapso. Fonte: NTSB.

Do ponto de vista da engenharia mecânica, o colapso da I-35W foi uma falha clássica de flambagem de placa. A chapa de ligação, sob intensa compressão dos membros que nela convergiam, encurvou-se para fora do plano e perdeu sua capacidade de carga. O erro foi agravado pelo peso adicional de equipamentos de construção e materiais na ponte no dia do colapso. Este caso sublinha a importância crítica da verificação de todos os componentes de uma estrutura, não apenas os membros principais, e demonstra como um erro de projeto aparentemente pequeno pode ter consequências catastróficas.

### 3.4.2 - O Desastre da Ponte de Quebec (1907): A Flambagem do Membro de Compressão

A construção da Ponte de Quebec foi marcada por não um, mas dois colapsos. O primeiro, em 1907, é um estudo de caso fundamental em flambagem de membros de compressão. Durante a construção, o braço sul da ponte cantilever desabou, matando 75 trabalhadores. A comissão de inquérito concluiu que a falha se originou nos cordões inferiores de compressão próximos ao pilar principal.

A análise de engenharia mecânica revelou que os projetistas haviam extrapolado incorretamente as fórmulas de flambagem para membros de uma escala nunca antes tentada. Os cordões de compressão, compostos por múltiplas placas de aço unidas por treliças de contraventamento, não possuíam a rigidez necessária para atuar como uma unidade coesa. Sob a imensa carga de compressão, eles encurvaram e falharam. Este desastre levou a uma revisão completa das teorias de flambagem e à compreensão de que a análise teórica deve ser sempre validada e usada com cautela ao se extrapolar para novas escalas e configurações.



Figura 8 - Ruínas da Ponte de Quebec após o colapso de 1907. A falha foi atribuída à flambagem dos membros inferiores de compressão, um erro crasso de projeto. Fonte: Library and Archives Canada.

### 3.5 - Conclusão Geral da Análise e Perspectivas Futuras

A análise aprofundada do rompimento de pontes de treliça, sob a ótica da engenharia mecânica, revela uma interação complexa entre a ciência dos materiais, a mecânica dos sólidos, a dinâmica estrutural e a análise numérica. A segurança e a durabilidade dessas estruturas não dependem de um único fator, mas de uma abordagem holística que integre:

**Análise de Fadiga e Fratura:** Para prever e gerenciar a degradação lenta de componentes críticos, como as juntas soldadas.

**Análise de Robustez e Colapso Progressivo:** Para garantir que a estrutura possa tolerar danos localizados sem uma falha catastrófica, considerando os efeitos dinâmicos.

**Análise Não-Linear:** Para capturar com precisão os modos de falha complexos, como a flambagem e o escoamento do material, que governam a capacidade última da estrutura.

**Lições Históricas:** Para informar o projeto e a prática de inspeção com base em falhas passadas, garantindo que os erros não se repitam.

A evolução contínua dos métodos computacionais, juntamente com o desenvolvimento de sistemas de monitoramento de saúde estrutural (SHM) em tempo real, oferece novas ferramentas para os engenheiros garantirem a segurança das pontes de treliça.

A integração de sensores de fibra ótica, análise de emissão acústica e modelos digitais (Digital Twins) permitirá uma transição de uma manutenção baseada em calendário para uma manutenção preditiva, baseada na condição real da estrutura, representando o próximo passo na prevenção de futuros colapsos.

## 4 - Estudo de Esforços Cisalhantes nas Conexões de Pontes Treliçadas

### 4.1 - Considerações Iniciais

As conexões em pontes treliçadas constituem regiões críticas onde se concentram os mecanismos de transferência de esforços entre elementos estruturais.

O comportamento dessas ligações sob solicitações de cisalhamento tem sido objeto de investigações experimentais e numéricas, particularmente no contexto de estruturas existentes que requerem avaliação e eventual reforço.

Esta seção apresenta uma análise comparativa de estudos recentes sobre o comportamento de conexões rebitadas, baseando-se principalmente nos trabalhos experimentais de Liu et al. (2025) sobre juntas reforçadas da Ponte Songpu e nas investigações numéricas de Jost (2011) sobre mecanismos de colapso progressivo em estruturas treliçadas.

#### 4.2 - Mecanismos de Transferência de Esforços em Conexões Rebitadas

A transferência de cisalhamento em conexões rebitadas ocorre através de mecanismos complexos que evoluem com o nível de carregamento. Inicialmente, as forças são transmitidas por atrito entre as superfícies das chapas em contato, mobilizado pela força de aperto residual do processo de rebitagem a quente. Esta fase inicial, caracterizada por comportamento aproximadamente linear, persiste até que a força aplicada supere a resistência ao deslizamento da conexão.

Superada a resistência por atrito, inicia-se o deslizamento relativo entre as chapas, resultando no contato direto entre o fuste do rebite e a parede do furo. Neste estágio, desenvolvem-se tensões de apoio que crescem progressivamente com o aumento do carregamento. O comportamento força-deslocamento resultante apresenta características não-lineares distintas, com rigidez inicial elevada seguida de uma transição gradual para um patamar de escoamento.

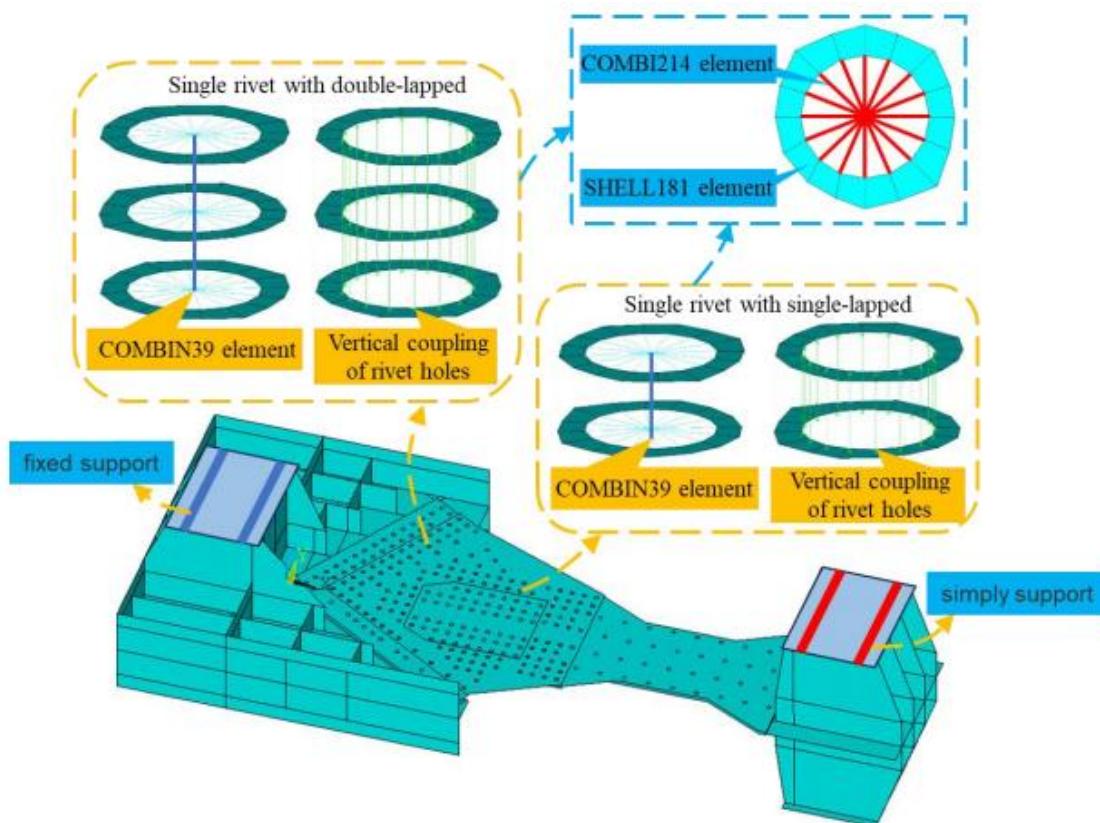


Figura 9 - Modelagem numérica de conexões rebitadas utilizando elementos finitos: (a) rebite com dupla chapa (double-lapped) e (b) rebite com chapa simples (single-lapped), com indicação dos elementos COMBIN39 (cisalhamento), COMBI214 (compressão) e SHELL181 (chapas), além dos vínculos aplicados.

A modelagem computacional desses mecanismos requer consideração adequada das não-linearidades envolvidas. A utilização de elementos especializados, como os elementos COMBI214 para simular ação de apoio e COMBIN39 para representar o comportamento ao cisalhamento, permite capturar a resposta complexa da conexão. As curvas constitutivas obtidas experimentalmente indicam capacidade última de 210 kN por plano de cisalhamento para configurações de duplo cisalhamento, valor que se mantém relativamente estável até deformações da ordem de 8 mm.

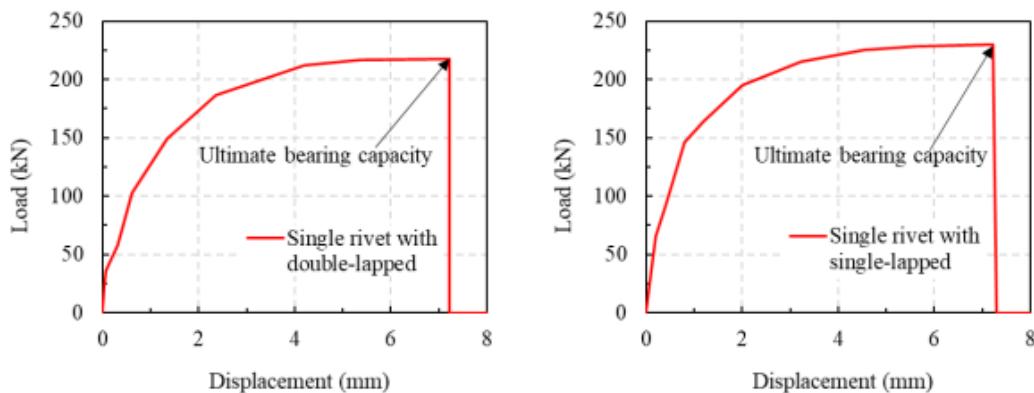


Figura 10 - Curvas carga × deslocamento obtidas em ensaios de cisalhamento para rebites simples em configurações de dupla e simples sobreposição.

A formulação de Palmgren para determinação da rigidez radial dos elementos de apoio estabelece uma relação potencial entre a rigidez e a espessura das chapas conectadas:

$$K_l = \frac{3,84 \times 10^{-5}}{l^{0,8}}$$

Esta relação, validada através de correlações experimental-numéricas, fornece valores de rigidez de  $2,4 \times 10^5$  N/mm e  $4,0 \times 10^5$  N/mm para chapas de 30 mm e 16 mm de espessura, respectivamente. A incorporação desses valores nos modelos numéricos resulta em previsões acuradas do comportamento global da conexão.

#### 4.3 - Distribuição de Esforços e Efeitos de Concentração

A distribuição de forças cisalhantes entre múltiplos rebites em uma conexão apresenta significativa não-uniformidade, influenciada pela rigidez relativa das chapas, espaçamento entre conectores e excentricidades do carregamento. Análises numéricas detalhadas revelam variações de até

40% nas forças cisalhantes entre rebites de uma mesma conexão, com concentrações máximas ocorrendo nas extremidades do grupo de conectores.

Este fenômeno de concentração de esforços nas bordas resulta da deformação diferencial das chapas conectadas. Os rebites extremos, submetidos a maiores deslocamentos relativos, absorvem parcela desproporcional do carregamento total. A progressão da plastificação local ao redor desses conectores mais solicitados leva à redistribuição gradual de esforços para os rebites internos, processo que continua até o estabelecimento de um estado de plastificação generalizada.

O efeito da rigidez das chapas de ligação (gusset plates) na distribuição de esforços é particularmente pronunciado. Chapas com menor rigidez flexional apresentam deformações fora do plano significativas, induzindo momentos fletores secundários nos rebites que reduzem sua capacidade efetiva ao cisalhamento. Observações experimentais registraram separações de até 5 mm entre chapas adjacentes no estado limite último, evidenciando a magnitude desses efeitos secundários.

#### 4.4 - Análise Comparativa de Abordagens Metodológicas

Tabela 2 - Comparações entre estudos.

Aspecto analisado	Liu et al. (2025)	Jost (2011)	Síntese / Convergência
Tipo de estudo	Experimental (escala real)	Numérico (modelagem por elementos finitos)	Abordagens complementares: dados reais × simulação sistêmica
Objeto de análise	Junta rebitada reforçada da Ponte Songpu	Estruturas treliçadas metálicas genéricas (colapso progressivo)	Ambos investigam ligações submetidas a cisalhamento
Objetivo principal	Avaliar comportamento e capacidade última de conexões reforçadas	Simular propagação de falhas locais até o colapso global	Entender a influência das conexões na robustez estrutural
Metodologia	Ensaios monotônicos até ruptura; 254 strain gauges; medições de deformação e deslocamento	Modelos não lineares (geométrica e materialmente); remoção súbita de elementos	Ambos tratam não linearidades e calibração de rigidez e ductilidade
Resultados principais	Carga última ≈ 11.868 kN; aumento de até 3,07× após reforço; falha dúctil predominante	Retenção de 40–70 % da capacidade após perda de um membro; redistribuição dinâmica observada	Reforço e ductilidade das conexões aumentam a robustez global

Modos de falha observados	Cisalhamento de rebites → necking nos membros diagonais	Falha localizada → redistribuição → colapso parcial	Sequência análoga: inicia localmente e se propaga progressivamente
Validação / Confiabilidade	Diferença de apenas 3,1 % entre resultados experimentais e numéricos	Modelos validados por comparação com casos experimentais de literatura	Consistência entre previsões teóricas e resultados físicos
Conclusões principais	Reforços bem projetados aumentam capacidade e mudam o modo de falha para dúctil	Redundância estrutural e ductilidade das ligações são decisivas para evitar colapso progressivo	Conexões robustas e dúcteis são chave para segurança e durabilidade

A investigação do comportamento ao cisalhamento de conexões tem sido conduzida através de abordagens metodológicas complementares. Estudos experimentais em escala real, como os realizados na junta A17 da Ponte Songpu, fornecem dados fundamentais sobre modos de falha, sequência de ruptura e capacidade última. Nesses ensaios, espécimes representando um quarto da geometria completa da junta foram submetidos a carregamento monotônico até a ruptura, com instrumentação extensiva incluindo 254 strain gauges para captura detalhada do campo de deformações.

Paralelamente, investigações numéricas focadas em colapso progressivo abordam o problema sob perspectiva sistêmica, avaliando como falhas localizadas podem propagar-se através da estrutura. Estas análises empregam modelos de elementos finitos com consideração de não-linearidades geométricas e materiais, simulando cenários de remoção súbita de elementos para quantificar a capacidade de redistribuição de esforços.

As duas abordagens convergem na identificação de mecanismos críticos, embora em escalas diferentes. Experimentalmente, observa-se a sequência: deslizamento inicial, ovalização de furos, cisalhamento de rebites extremos e falha dúctil dos membros. Numericamente, identifica-se progressão similar em escala estrutural: falha localizada, redistribuição dinâmica, sobrecarga de elementos adjacentes e propagação do colapso.

#### 4.5 - Comportamento de Juntas Reforçadas

O reforço de conexões existentes através da adição de chapas suplementares demonstra eficácia significativa no aumento da capacidade portante. Ensaios em juntas reforçadas revelam aumento de capacidade de até 3,07 vezes em relação às cargas de projeto originais, com modo de falha transitando de ruptura frágil dos conectores para escoamento dúctil dos membros principais.

A interação entre elementos originais e de reforço apresenta complexidades adicionais. A diferença de rigidez entre componentes novos e existentes resulta em distribuição não-uniforme de esforços durante os estágios iniciais de carregamento. Progressivamente, com o aumento das deformações e desenvolvimento de plastificações locais, ocorre equalização das tensões, mobilizando plenamente a capacidade do sistema composto.

Resultados experimentais indicam que a ruptura em juntas reforçadas inicia-se tipicamente pelo cisalhamento dos rebites que conectam as chapas originais às novas, seguida por necking nos membros diagonais. A carga última de 11.868 kN observada experimentalmente correlaciona-se satisfatoriamente com previsões numéricas de 12.242 kN, diferença de apenas 3,1% que valida os modelos computacionais desenvolvidos.

#### 4.6 - Análise de Modos de Falha

Os modos de falha observados em conexões rebitadas sob cisalhamento apresentam características distintivas dependentes da configuração geométrica e proporções da ligação. Para conexões curtas com poucos rebites, a falha ocorre predominantemente por cisalhamento dos conectores ou esmagamento localizado dos furos. Em conexões longas, o rasgamento das chapas (block shear) emerge como modo crítico, com superfícies de ruptura desenvolvendo-se através de combinações de cisalhamento e tração.

A transição entre modos de falha é governada pela relação entre as resistências ao cisalhamento dos rebites, ao esmagamento dos furos e ao rasgamento das chapas. Análises paramétricas demonstram que o aumento do número de rebites sem correspondente aumento na área das chapas pode transformar o modo de falha de cisalhamento dos conectores para rasgamento do material base, alteração que deve ser considerada em projetos de reforço.

O desenvolvimento de modelos preditivos para esses diferentes modos requer consideração adequada das interações entre mecanismos. A verificação normativa tradicional, baseada em análise independente de cada modo, pode resultar em previsões não-conservadoras quando múltiplos mecanismos atuam simultaneamente. Abordagens mais refinadas, incorporando critérios de interação, fornecem estimativas mais precisas da capacidade última.

#### 4.7 - Efeitos Dinâmicos e Colapso Progressivo

A consideração de efeitos dinâmicos é fundamental para avaliação realista do comportamento de conexões sob condições de falha súbita. O Fator de Amplificação Dinâmica (FAD), relacionando a resposta máxima dinâmica à resposta estática equivalente, pode atingir valores teóricos de 2,0 para

aplicação instantânea de carga. Em situações práticas, considerando amortecimento estrutural e tempo finito de aplicação, valores de FAD entre 1,3 e 1,7 são mais representativos.

A capacidade de estruturas treliçadas resistirem ao colapso progressivo depende fundamentalmente da existência de caminhos alternativos de carga (Alternative Load Paths - ALPs). Análises numéricas indicam que estruturas com adequada redundância podem manter 40% a 70% da capacidade original após perda de um membro crítico. Esta capacidade residual é fortemente influenciada pela robustez das conexões, que devem possuir ductilidade suficiente para acomodar as redistribuições de esforços sem ruptura frágil.

A quantificação da vulnerabilidade ao colapso progressivo através de índices de robustez permite identificação de elementos críticos cujo reforço prioritário maximiza o benefício estrutural global. Conexões identificadas como pontos de articulação na topologia estrutural requerem particular atenção, dado seu potencial de iniciar sequências catastróficas de falha.

#### **4.8 - Implicações para Projeto e Avaliação**

A síntese dos estudos analisados estabelece diretrizes importantes para projeto e avaliação de conexões rebitadas. A capacidade ao cisalhamento deve ser verificada considerando tanto estados limites últimos quanto de serviço, com atenção particular aos efeitos de fadiga em estruturas sujeitas a carregamento cíclico. Fatores de segurança diferenciados devem ser aplicados conforme o modo de falha esperado, com valores mais conservadores para modos frágeis.

A inspeção de estruturas existentes deve priorizar a identificação de sinais precursores de falha, incluindo ovalização excessiva de furos, corrosão em interfaces de contato e evidências de deslizamento relativo entre chapas. A detecção precoce desses indicadores permite intervenção preventiva antes do desenvolvimento de danos irreversíveis.

Estratégias de reforço devem buscar não apenas aumento de capacidade local, mas também melhoria da redundância estrutural global. A adição de conectores ou chapas suplementares deve ser projetada considerando compatibilidade de deformações entre elementos novos e existentes, evitando concentrações de tensão que possam precipitar novos modos de falha.

A validação experimental permanece essencial para calibração de modelos numéricos e verificação de hipóteses de projeto. A complexidade dos mecanismos envolvidos e a variabilidade inerente a estruturas antigas tornam a abordagem puramente analítica insuficiente para garantia adequada de segurança. Programas de monitoramento estrutural, incorporando medições periódicas de deformações e deslocamentos, fornecem dados valiosos para avaliação contínua da integridade estrutural.

## 5 - Conclusões

A análise realizada ao longo deste estudo evidencia que a segurança e a durabilidade de pontes treliçadas dependem de uma abordagem integrada que combine fundamentos de engenharia estrutural, ciência dos materiais e análise numérica avançada. Os modos de ruptura observados — fadiga, flambagem, falha em ligações e colapso progressivo — mostram que a falha raramente é resultado de um único fator, mas sim da interação entre degradação material, deficiências construtivas e ausência de redundância estrutural.

Os estudos comparativos apresentados demonstram que conexões reforçadas e detalhamentos que priorizam a ductilidade aumentam significativamente a robustez global da estrutura, reduzindo o risco de colapsos em cadeia. Do mesmo modo, o uso de modelagem não linear e simulações de elementos finitos mostrou-se essencial para prever o comportamento real das treliças sob condições extremas, permitindo avaliar com precisão efeitos dinâmicos e modos de falha complexos.

As lições aprendidas com colapsos históricos, como os das pontes de Quebec e I-35W, reforçam a importância de inspeções periódicas, controle de qualidade em ligações e aplicação rigorosa das normas de projeto. O avanço de tecnologias de monitoramento estrutural em tempo real, associado a estratégias de manutenção preditiva, representa o futuro da gestão segura dessas estruturas.

Conclui-se, portanto, que o estudo de ruptura em pontes de treliça não se limita à compreensão dos mecanismos de falha, mas envolve a criação de sistemas estruturais resilientes, capazes de suportar danos localizados sem perda global de estabilidade. A combinação de conhecimento teórico, validação experimental e inovação tecnológica é o caminho para garantir pontes mais seguras, duráveis e eficientes.

## 6 - Referências Bibliográficas

Walbridge, S., & Nussbaumer, A. (2008). Probabilistic fatigue analysis of shop and field treated tubular truss bridges. *Journal of Constructional Steel Research*, 64(2), 156-166. <https://estudogeral.sib.uc.pt/bitstream/10316/10742/1/Probabilistic%20fatigue%20analysis%20of%20shop%20and%20field%20treated%20tubular%20truss%20bridges.pdf>

Chen, Y., Liao, Y., Zhu, L., Chen, L., & Chen, Y. (2024). Robustness of a Steel Truss Bridge Subjected to Sudden Member Breakage during the Continuous-to-Simply-Supported Transition. *Buildings*, 14(10), 3035. <https://www.mdpi.com/2075-5309/14/10/3035>

Fracture Mechanics. (2024). *Loading Modes I, II, III*. <https://www.fracturemechanics.org>

ScienceDirect. (2023). *Learning from failure propagation in steel truss bridges*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350630723004429>

SOFiSTiK. (2024). *Nonlinear Buckling Analysis of Network Arch Bridges*. <https://sofistikforyou.com>

ANJOS, Edinelson Cavalcanti dos; GALDINO, Ian Lucas; SÁ, Ronaldo Cardoso de. **Análise de estabilidade estrutural para uma treliça metálica.** In: **CONSTRUMETAL 2016 – Congresso Latino-americano da Construção Metálica**, 20–22 set. 2016, São Paulo. *Anais....* [São Paulo]: [s.n.], 2016.

FERNÁNDEZ, Bianca Oliveira. **Sistemas de treliças modulares para pontes de madeira: uma boa alternativa para o Estado do Pará.** 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

VILELA, Paula Moura Leite. **Modelagem de ligações parafusadas pelo método dos elementos finitos.** 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Belo Horizonte, 2016.

VALLE, Ângela do; LA ROVERE, Henriette Lebre. **ECV 5219 – Análise Estrutural I: apostila.** Florianópolis: Departamento de Engenharia Civil, UFSC, 2009.

FERREIRA, Mateus Evangelista Duque; PELARIN, André Luis; BENTO, Rodrigo Teixeira. **Designing and qualitative structural analysis of a Warren truss bridge.** *Revista Caderno Pedagógico*, Curitiba: Studies Publicações e Editora Ltda., v. 20, n. 5, p. 1345-1361, 2023. DOI: 10.54033/cadpedv20n5-017. VITÓRIO, José Afonso Pereira. **Casos de colapsos estruturais em pontes, viadutos e passarelas.** Recife, 12 nov. 2015. Seminário “Riscos e acidentes estruturais em obras de engenharia civil”. Material de apresentação.

VITÓRIO, José Afonso Pereira. **Uma análise das falhas estruturais em obras de arte especiais.** [S.l.]: [s.n.], [s.d.]. Artigo técnico (manuscrito).

UNIVAG – Centro Universitário. **Resistência dos materiais: tração, compressão e lei de Hooke.** [Várzea Grande]: UNIVAG, [s.d.]. Apostila.