



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO AMAPÁ
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

BRUNO HENRIQUE SILVA E SILVA
JOÃO VICTOR BATISTA QUINTAS

**ANÁLISE DE SEGURANÇA ESTRUTURAL DE VIGAS DE
CONCRETO ARMADO DIMENSIONADAS AO CISALHAMENTO**

MACAPÁ - AP
2025

BRUNO HENRIQUE SILVA E SILVA
JOÃO VICTOR BATISTA QUINTAS

**ANÁLISE DE SEGURANÇA ESTRUTURAL DE VIGAS DE
CONCRETO ARMADO DIMENSIONADAS AO CISALHAMENTO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado a coordenação do curso de
Bacharelado em Engenharia Civil como
requisito avaliativo para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Dr.^a Natasha Cristina da
Silva Costa

MACAPÁ - AP
2025

Biblioteca Institucional - IFAP
Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)


- S586a Silva, Bruno Henrique Silva e
 Análise de segurança estrutural de vigas de concreto armado
 dimensionadas ao cisalhamento / Bruno Henrique Silva e Silva, João
 Victor Batista Quintas. - Macapá, 2025.
 40 f.: il.
- Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) -- Instituto Federal de
 Educação, Ciência e Tecnologia do Amapá, Campus Macapá,
 Bacharelado em Engenharia Civil, 2025.
- Orientadora: Dra. Natasha Cristina da Silva Costa.
1. Concreto armado. 2. Cisalhamento. 3. Comparativo normativo. I.
 Quintas, João Victor Batista. I. Costa, Dra. Natasha Cristina da Silva ,
 orient. II. Título.
-

BRUNO HENRIQUE SILVA E SILVA
JOÃO VICTOR BATISTA QUINTAS


**ANÁLISE DE SEGURANÇA ESTRUTURAL DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO
DIMENSIONADAS AO CISALHAMENTO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado a coordenação do curso de
Bacharelado em Engenharia Civil como
requisito avaliativo para obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Civil.


BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **NATASHA CRISTINA DA SILVA COSTA**
Data: 03/01/2026 08:45:22-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof^a Dr.^a Natasha Cristina da Silva Costa (Orientadora)
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do
Amapá

Documento assinado digitalmente
 **LEILA CRISTINA NUNES RIBEIRO**
Data: 05/01/2026 16:16:19-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof^a Me. Leila Cristina Nunes Ribeiro
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amapá

Documento assinado digitalmente
 **TARCISIO SANTIAGO GOMES FILHO**
Data: 05/01/2026 17:38:01-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof^a Dr. Tarcisio Santiago Gomes Filho
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amapá

Apresentado em: 19 / 12 / 2025

Conceito/Nota: 94

Dedico este trabalho a Deus, pelo amparo, pela sabedoria e por me fortalecer diante dos desafios ao longo desta jornada. À minha família, em especial aos meus pais, Larissa Sussuarana Batista e Jair Victor Dias Quintas, pelo apoio constante desde o início, pelo amor, carinho, cuidado e por sempre me proporcionarem o melhor. Sem vocês, eu não teria chegado até aqui. Aos meus amigos e docentes, que estiveram ao meu lado até o fim, oferecendo orientação, incentivo e contribuindo de forma essencial para o meu crescimento pessoal e profissional.

João Victor Quintas

Dedico este trabalho primeiramente a Deus, autor da minha fé. E à minha família, que me deram base para crescer desde o início. Aos que me apoiaram nos momentos de incerteza. Esta conquista é dedicada a vocês.

Bruno Henrique Silva e Silva

AGRADECIMENTOS

A nossa orientadora, Dr^a Natasha Cristina Costa, cuja dedicação, competência e disponibilidade foram fundamentais para a nossa vida acadêmica e para a realização deste trabalho. Sua orientação atenta, suas contribuições técnicas e seu compromisso em acompanhar cada etapa do processo foram essenciais para o nosso desenvolvimento acadêmico. Somos gratos pela paciência, pelo apoio constante e pela forma sempre parceira com que conduziu este trabalho, tornando esta caminhada mais leve e produtiva.

RESUMO

A resistência ao cisalhamento em vigas de concreto armado constitui um dos aspectos mais críticos do dimensionamento estrutural, devido à natureza frágil e repentina desse modo de ruptura. Este Trabalho de Conclusão de Curso caracteriza-se como uma pesquisa teórico-analítica e comparativa que tem como objetivo avaliar a segurança e a confiabilidade dos modelos de cálculo prescritos pelas normas ABNT NBR 6118, Eurocode 2 e ACI 318. A metodologia desenvolvida baseia-se na confrontação das previsões normativas com um amplo banco de dados experimental composto por 176 vigas, utilizando-se para a validação a análise estatística descritiva e o sistema de Classificação por Pontos de Demérito (DPC) fundamentado nos critérios de Collins. Observa-se, a partir dos resultados obtidos, que o modelo americano ACI 318 apresenta o desempenho mais equilibrado e seguro, enquanto o Eurocode 2 demonstra baixa dispersão estatística, mas tende a resultados nominais contra a segurança. Conclui-se que o modelo da norma brasileira ABNT NBR 6118 exibe a maior variabilidade e índices preocupantes de insegurança para determinadas configurações geométricas, evidenciando a necessidade de revisão dos parâmetros de cálculo para garantir níveis de confiabilidade compatíveis com os padrões internacionais.

Palavras-chave: cisalhamento; segurança estrutural; NBR 6118; ACI 318; Eurocode 2.

ABSTRACT

Shear strength in reinforced concrete beams constitutes one of the most critical aspects of structural design due to the brittle and sudden nature of this failure mode. This undergraduate thesis is characterized as a theoretical-analytical and comparative research aimed at evaluating the safety and reliability of calculation models prescribed by ABNT NBR 6118, Eurocode 2, and ACI 318 standards. The developed methodology is based on confronting normative predictions with a broad experimental database comprising 176 beams, using descriptive statistical analysis and the Demerit Points Classification (DPC) system based on Collins' criteria for validation. It is observed, from the obtained results, that the American ACI 318 model presents the most balanced and safe performance, while Eurocode 2 demonstrates low statistical dispersion but tends towards unsafe nominal results. It is concluded that the Brazilian ABNT NBR 6118 model exhibits the highest variability and concerning insecurity indices for certain geometric configurations, evidencing the need for revision of calculation parameters to ensure reliability levels compatible with international standards.

Keywords: shear; structural safety; NBR 6118. ACI 318; Eurocode 2.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Modos de fissuração e ruína por força cortante em vigas.....	15
Figura 2 - Treliça de Morsch com esforços atuantes e internos em uma seção S.....	17
Figura 3 - Correlação entre os dados experimentais e normativo da ACI 318.....	26
Figura 4 - Dispersão entre os resultados experimentais e normativo da ACI 318.....	26
Figura 5 - Correlação entre os dados experimentais e normativo da EC 2	27
Figura 6 - Dispersão entre os resultados experimentais e normativo da EC 2.....	27
Figura 7 - Correlação entre os dados experimentais e normativo da NBR 6118.....	28
Figura 8 - Dispersão entre os resultados experimentais e normativo da NBR 6118.	28
Figura 9 - Histograma comparativo da classificação de segurança das vigas segundo o critério de Collins (DPC) para os modelos da ACI 318	29
Figura 10 - Histograma comparativo da classificação de segurança das vigas segundo o critério de Collins (DPC) para os modelos da EC 2.....	30
Figura 11 - Histograma comparativo da classificação de segurança das vigas segundo o critério de Collins (DPC) para os modelos da NBR 6118.....	31

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação quanto aos critérios de segurança segundo o sistema DPC.	20
Tabela 2 - Resumo do Banco de dados.....	23
Tabela 3 – Resumo Estatístico da Razão $V_{u,exp} / V_{u,teo}$	25
Tabela 4 – Resumo Estatístico da Razão $V_{u,exp} / V_{u,teo}$	29
Tabela 5 – Resumo Estatístico da Razão $V_{u,exp} / V_{u,teo}$	30
Tabela 6 – Resumo Estatístico da Razão $V_{u,exp} / V_{u,teo}$	31

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	11
1.1	Considerações iniciais	11
1.2	Justificativa	12
1.3	Objetivo geral	12
1.4	Objetivos específicos	12
2	REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.1	Concreto armado: conceitos gerais	14
2.2	Resistência ao cisalhamento.....	14
2.3	Mecanismos de transferência de esforços	15
2.4	Teorias modernas: teoria do campo de compressão	16
2.5	Modelos de cálculo do cisalhamento	16
2.5.1	ACI 318-19 (ACI 318M-25)	17
2.5.2	Eurocode 2 (EN 1992-1-1:2004)	18
2.5.3	ABNT NBR 6118:2023.....	18
2.6	Análise da segurança pelos critérios de collins (2001)	19
3	METODOLOGIA	22
4	BANCO DE DADOS.....	23
5	RESULTADOS E DISCUSÕES.....	25
5.1	Análise estatística e comparativa.....	25
5.2	Avaliação da confiabilidade (critério de collins).....	29
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	32
	REFERÊNCIAS.....	35
	ANEXOS A – BANCO DE DADOS.....	36

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

O dimensionamento de elementos de concreto armado é regido por normas técnicas que buscam garantir a segurança das estruturas frente aos diversos modos de falha possíveis. Dentre eles, a ruptura por cisalhamento se destaca como um dos fenômenos mais críticos e complexos. Diferentemente da ruptura por flexão, que é dúctil e precede o colapso com grandes deformações e fissuras visíveis, a falha por cisalhamento possui uma natureza frágil, ocorrendo de forma súbita e com poucos sinais de aviso. Essa característica impõe que sua previsão seja tratada com o máximo rigor nos códigos de projeto. Apesar de décadas de pesquisa, os mecanismos de transferência de força cortante em vigas de concreto armado ainda são objeto de intenso debate acadêmico, resultando em modelos teóricos distintos.

Essa divergência se reflete nas principais normas técnicas mundiais, como a brasileira NBR 6118, a europeia Eurocode 2 e a norte-americana ACI 318, que adotam formulações e filosofias de dimensionamento diferentes para prever a resistência ao cisalhamento. Tais discrepâncias levam a dimensionamentos que podem variar significativamente em termos de taxa de armadura transversal e, conseqüentemente, em seus níveis de segurança e custo. Diante desse cenário, emergem questionamentos fundamentais para a prática da engenharia e para a evolução normativa. Qual é o real nível de segurança e precisão oferecido pelas prescrições da NBR 6118, do Eurocode 2 e do ACI 318 quando suas previsões teóricas são confrontadas com uma ampla gama de resultados experimentais? O nível de segurança implícito na norma brasileira é compatível com os benchmarks de confiabilidade adotados internacionalmente, ou ela se mostra significativamente mais ou menos conservadora que suas congêneres? Este trabalho se propõe a investigar essas questões, buscando quantificar a confiabilidade e o desempenho dos principais modelos normativos para o dimensionamento ao cisalhamento.

A engenharia estrutural opera sobre um binômio indissociável, segurança e economia. A otimização de projetos de concreto armado passa, necessariamente, pela utilização de modelos normativos que sejam, ao mesmo tempo, seguros e precisos. Um modelo excessivamente conservador onera a construção sem um ganho de segurança proporcional, enquanto um modelo com precisão

insuficiente pode comprometer a integridade estrutural e a segurança dos usuários. A ruptura por cisalhamento, por seu caráter frágil e catastrófico, torna a avaliação crítica de seus modelos de cálculo uma tarefa de permanente relevância.

A relevância deste estudo é multifacetada, pois fornecerá aos projetistas uma análise quantitativa da dispersão e do nível de segurança de cada norma, contribuirá para a comunidade científica com uma metodologia consolidada de validação e um banco de dados para futuras pesquisas, e oferecerá subsídios técnicos valiosos aos comitês de normalização responsáveis pela revisão da NBR 6118, garantindo o alinhamento da prática brasileira aos padrões globais de segurança.

1.2 Justificativa

Esta pesquisa se justifica pela necessidade de realizar uma meta-análise abrangente e sistemática do desempenho dos modelos de cisalhamento presentes na NBR 6118, no Eurocode 2 e no ACI 318. Enquanto estudos individuais oferecem contribuições valiosas, a compilação e o tratamento estatístico de uma vasta base de dados experimentais, extraída da literatura científica global, permitem uma avaliação com maior robustez e validade estatística. Tal abordagem possibilita ir além de uma simples comparação de resultados médios, permitindo identificar tendências, vieses e a consistência de cada modelo em um universo amplo de cenários de projeto.

1.3 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é analisar comparativamente a segurança e a confiabilidade dos modelos de cálculo para a resistência ao cisalhamento prescritos pela norma brasileira NBR 6118, pela norma europeia Eurocode 2 e pela norma americana ACI 318, utilizando como referência uma ampla base de dados experimentais.

1.4 Objetivos específicos

- a) Construir um banco de dados robusto (176 vigas) a partir da literatura científica;
- b) Calcular a resistência teórica para cada viga, segundo as três normas;

c) Realizar análise estatística comparativa (segurança e precisão).

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este tópico refere-se à abordagem das seguintes conceituações: os conceitos gerais do concreto armado e as filosofias das principais normas (ABNT NBR 6118, ACI 318 e Eurocode 2); os mecanismos físicos que compõem a resistência ao cisalhamento; os modelos de cálculo históricos e atuais, como a Teoria da Treliça e a Modified Compression Field Theory (MCFT); e, por fim, os critérios de Collins (2001) para a análise de segurança e confiabilidade.

2.1 Concreto armado: conceitos gerais

O concreto armado é amplamente empregado em obras civis por sua versatilidade, durabilidade e capacidade de resistir a diferentes tipos de esforços. A união entre o concreto e o aço permite que os dois materiais atuem de forma complementar: enquanto o concreto apresenta elevado desempenho à compressão, o aço supre a baixa resistência do concreto à tração. Essa combinação proporciona rigidez, ductilidade e eficiência estrutural, tornando o sistema adequado a elementos submetidos a flexão, cisalhamento e torção.

Segundo a ABNT NBR 6118:2023, o dimensionamento das estruturas de concreto deve garantir segurança, estabilidade e funcionalidade, considerando o atendimento aos Estados Limites Últimos (ELU) e Estados Limites de Serviço (ELS). Essa filosofia é compartilhada por normas internacionais, como o ACI 318M-25 (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 2025) e o Eurocode 2 (2004), que também se baseiam na teoria dos estados limites e na aplicação de coeficientes parciais de segurança para representar as incertezas associadas às resistências dos materiais e às ações atuantes.

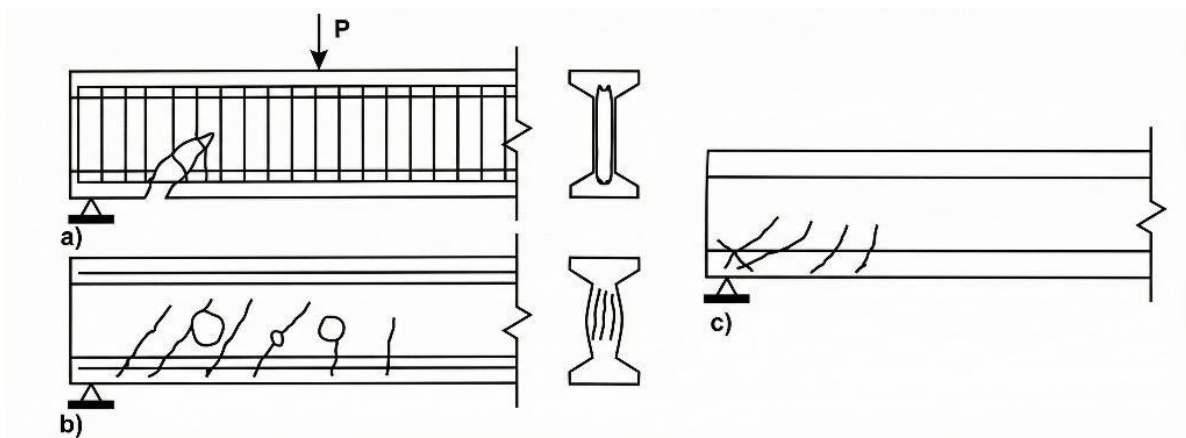
Conforme fundamentalmente descrito por Fusco, o comportamento do concreto armado não depende apenas das propriedades mecânicas, mas também da aderência entre o concreto e o aço, da compatibilidade de deformações e do controle de fissuração. A eficácia do funcionamento das armaduras depende, portanto, do respeito às condições de compatibilidade do trabalho solidário dos dois materiais.

2.2 Resistência ao cisalhamento

O cisalhamento em vigas de concreto armado é um fenômeno estrutural complexo e não linear, cuja análise envolve múltiplos mecanismos resistentes. Sob a ação combinada de forças cortantes e momentos fletores, surgem fissuras inclinadas que alteram a distribuição de tensões internas e reduzem a rigidez da estrutura. O comportamento pós-fissuração é determinado pela interação entre o concreto e as armaduras, pela resistência à tração do concreto e pelas propriedades geométricas da seção transversal. Diferentemente de uma ruptura por flexão, que é dúctil e sinalizada por grandes deslocamentos, a ruptura por cisalhamento é catastrófica e ocorre com pouca ou nenhuma deformação prévia, representando um dos maiores riscos à segurança de uma estrutura.

Como descreve Fusco, o concreto é um material com baixa resistência à tração. Quando as tensões principais de tração (σ_1) superam a resistência do material (f_{ct}), ocorre a ruptura por separação diagonal, muitas vezes sem o escoamento prévio das armaduras, o que torna esse modo de falha extremamente perigoso para a segurança global da estrutura.

Figura 1 - Modos de fissuração e ruína por força cortante em vigas.



Fonte: Carvalho e Figueiredo Filho (2014).

2.3 Mecanismos de transferência de esforços

Antes da ruptura total, ou mesmo após a fissuração inicial, a transferência de esforços cortantes em uma viga (especialmente a parcela atribuída ao concreto, V_c) ocorre através da interação de três mecanismos principais, conforme detalhado por Costa (2022) e Fusco:

- a) **Engrenamento de Agregados:** É a resistência ao deslizamento entre as duas faces de uma fissura rugosa. Os agregados graúdos "costuram" a fissura, transferindo tensões tangenciais. A eficiência deste mecanismo depende da largura da fissura e do diâmetro máximo do agregado;
- b) **Efeito de Pino:** A armadura longitudinal de flexão atua como um pino ao cruzar a fissura diagonal, resistindo a uma parcela do esforço cortante e restringindo a abertura da fissura;
- c) **Zona Comprimida:** A região de concreto não fissurada no topo da viga resiste aos esforços de cisalhamento na zona de compressão, contribuindo para a estabilidade do banzo superior da treliça.

2.4 Teorias modernas: teoria do campo de compressão

Modelos mais avançados, como a Teoria do Campo de Compressão Modificada (MCFT) desenvolvida por Collins e Mitchell, tratam o concreto fissurado como um novo material com comportamento próprio. Diferente da treliça simples, a MCFT considera a compatibilidade de deformações e a tensão média no concreto fissurado, permitindo prever não apenas a carga de ruptura, mas também a deformação da peça e a largura das fissuras.

Conforme salientam Collins e Mitchell (1991), o desempenho global depende da interação simultânea desses mecanismos, que variam conforme a geometria da viga, a taxa de armadura transversal, a resistência do concreto e o nível de deformação. Modelos puramente empíricos tendem a não capturar adequadamente essas interações, razão pela qual abordagens mais racionais, baseadas na compatibilidade de deformações, vêm sendo amplamente difundidas.

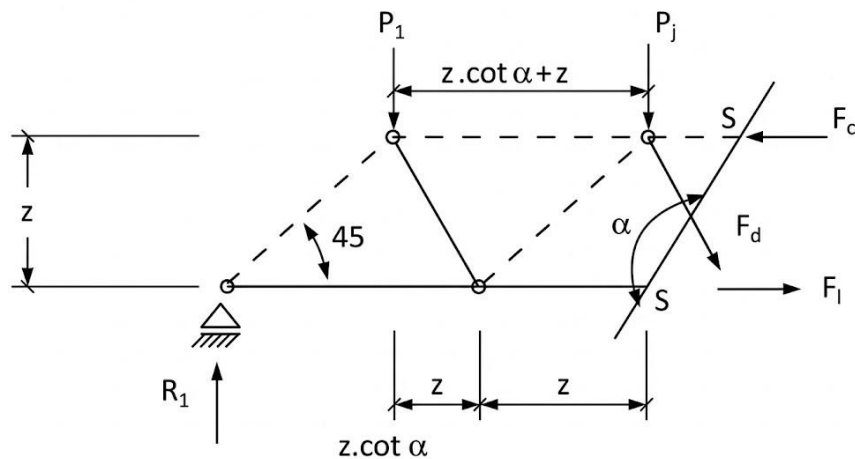
2.5 Modelos de cálculo do cisalhamento

Historicamente, o dimensionamento ao cisalhamento foi tratado de forma empírica, com base em resultados experimentais e simplificações teóricas. O modelo de Ritter (1899) e Morsch (1922) representou um avanço importante ao propor a teoria da treliça, segundo a qual a viga fissurada pode ser idealizada como um sistema de bielas comprimidas de concreto e tirantes tracionados de aço. Essa abordagem é a base do Método das Bielas e Tirantes, que Fusco identifica como fundamental para

o tratamento de esforços tangenciais e zonas de perturbação. Neste modelo, a vigafissurada comporta-se como uma treliça onde:

- O concreto comprimido entre as fissuras atua como bielas diagonais;
- Os estribos atuam como tirantes tracionados;
- As armaduras longitudinais e a zona comprimida formam os banzos.

Figura 2 - Treliça de Morsch com esforços atuantes e internos em uma seção S.



Fonte: Carvalho e Figueiredo Filho (2014).

As normas contemporâneas adotam essa analogia de treliça, mas diferem na forma como calculam as contribuições do aço (tirantes) e do concreto (bielas).

2.5.1 ACI 318-19 (ACI 318M-25)

A ACI 318M-25 (2025) baseia sua formulação na Modified Compression Field Theory (MCFT), desenvolvida por Collins e Mitchell (1991) e consolidada em Collins (2001). Essa teoria representa um dos maiores avanços na modelagem do cisalhamento, pois descreve o comportamento das vigas fissuradas a partir de relações tensão–deformação que consideram o amolecimento do concreto sob tração e a interação entre os componentes estruturais. A MCFT permite avaliar a resistência e a deformabilidade com maior precisão, servindo de base para procedimentos de verificação de segurança adotados em códigos como o Canadian Code (CSA A23.3) e o próprio ACI.

$$V_c = 0,66 \cdot \lambda_s \cdot (\rho)^{\frac{1}{3}} \cdot \sqrt{f_c} \cdot b_w \cdot d$$

Onde:

$$\lambda_s = \sqrt{\frac{2}{1 + 0,004 \cdot d}} \leq 1$$

$$\rho = \text{Taxa de armadura longitudinal} = \frac{A_s}{b_w \cdot d}$$

f_c = Resistência a compressão do concreto;

b_w = largura da seção transversal da viga;

d = altura efetiva da viga;

2.5.2 Eurocode 2 (EN 1992-1-1:2004)

O Eurocode 2 (2004) aprimora essa teoria ao introduzir o modelo de treliça com ângulo variável, permitindo que o ângulo θ das bielas seja ajustado de acordo com a deformação e o tipo de sollicitação atuante. Esse modelo reconhece que o ângulo de compressão se altera após a fissuração, refletindo uma resposta mais realista do elemento estrutural. A resistência ao cisalhamento, portanto, é obtida a partir do equilíbrio entre tensões de tração e compressão e das condições de compatibilidade de deformações.

$$V_c = \left[0,18 \cdot k \left(100 \cdot \frac{A_{sl}}{b_w \cdot d} \cdot f_{ck} \right)^{1/3} \right] \cdot b_w \cdot d$$

Onde:

k = fator relacionado ao size effect;

A_{sl} = Área de aço da armadura longitudinal;

b_w = Largura da seção transversal;

d = Altura útil da seção;

f_{ck} = Resistência a compressão do concreto.

2.5.3 ABNT NBR 6118:2023

A norma brasileira apresenta dois modelos de cálculo para verificação de vigas com estribos (com inclinação $\alpha = 90^\circ$).

Modelo I:

Este modelo assume um ângulo fixo de 45° para as bielas de compressão ($\theta = 45^\circ$). A força cortante de cálculo resistente (V_{Rd}) é dada pela soma da contribuição do concreto (V_c) e da contribuição dos estribos (V_{sw}). Embora seguro, ele tende a ser conservador, pois experimentos mostram que as fissuras frequentemente se formam com inclinações menores, o que resulta em uma armadura transversal maior do que a estritamente necessária em muitos casos.

$$V_c = V_{c0} = 0,6 \cdot f_{ctd} \cdot b \cdot d$$

$$f_{ctd} = 0,21 \cdot f_c^{2/3}$$

Modelo II:

Já este modelo reconhece que o ângulo da biela (θ) pode variar dentro de certos limites ($30^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$ ou $21,8^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$). Ao permitir um ângulo menor (bielas mais "deitadas"), mobiliza-se um maior número de estribos para cruzar uma única fissura, aumentando a eficiência da armadura, mas exigindo a verificação das altas tensões de compressão no concreto da biela. A parcela V_c é reduzida ou zerada (conforme Equações 2-24 e 2-25, COSTA, 2022). A resistência dos estribos é:

$$V_c = V_{c0} \text{ quando } V_{sd} \leq V_{c0}$$

$$V_c = 0 \text{ quando } V_{sd} = V_{Rd2}$$

$$V_{Rd2} = 0,54 \cdot \left(1 - \frac{fck}{250}\right) \cdot fck \cdot b_w \cdot d \cdot \sin^2 \theta \cdot \cotg \theta$$

$$V_c = V_{c0} \cdot \frac{V_{Rd2} - V_{sd}}{V_{Rd2} - V_{c0}}$$

Onde:

b = é a menor largura compreendida ao longo da altura útil d ;

d = altura útil da seção igual a distância da borda comprimida até o centro de gravidade da armadura longitudinal.

2.6 Análise da segurança pelos critérios de collins (2001)

A abordagem proposta por Collins (2001) para a avaliação da segurança estrutural está fundamentada na Teoria do Campo de Compressão Modificada (MCFT), que busca representar o comportamento físico das vigas fissuradas através da compatibilidade de deformações e do equilíbrio interno de forças.

Para quantificar e comparar a confiabilidade dos diferentes modelos normativos (NBR 6118, Eurocode 2 e ACI 318), este trabalho adota a metodologia de classificação por pontos de demérito, conhecida como Sistema DPC (Demerit Points Classification). Conforme aplicado por Costa (2022), este sistema avalia a razão entre a carga última experimental ($V_{u,exp}$) e a carga prevista pelo modelo teórico ($V_{u,teo}$), atribuindo penalidades (pontos de demérito) com base no nível de segurança ou conservadorismo da previsão.

O objetivo do DPC é penalizar mais severamente as previsões que se mostram contra a segurança (onde a resistência real é menor que a prevista), mas também penalizar, em menor grau, os modelos excessivamente conservadores, que resultam em estruturas antieconômicas.

A classificação das vigas e a atribuição de penalidades seguem os critérios apresentados na Tabela 1:

Tabela 1 - Classificação quanto aos critérios de segurança segundo o sistema DPC.

$V_{u,teo}/V_{u,exp}$	Classificação	Penalidade
< 0.50	Extremamente perigoso	10
$[0,50\sim 0,8]$	Perigoso	5
$[0,8\sim 1,1]$	Segurança Adequada	0
$[1,1\sim 2,0[$	Conservador	1
≥ 2.0	Extremamente Conservador	2

Fonte: Adaptado de Costa (2022).

De acordo com essa metodologia:

- a) Segurança Adequada (Penalidade 0): É a faixa ideal, onde a previsão teórica se aproxima da carga real de ruptura, com uma margem de erro aceitável (entre 0,8 e 1,1);
- b) Perigoso e Extremamente Perigoso (Penalidades 5 e 10): Ocorrem quando o modelo superestima a resistência da viga (a viga rompe com uma carga muito menor do que a calculada). Estas situações recebem as maiores penalidades, pois representam risco de colapso estrutural;
- c) Conservador e Extremamente Conservador (Penalidades 1 e 2): Ocorrem quando o modelo subestima a resistência (a viga suporta muito mais carga do que o calculado). Embora seguros, esses modelos recebem penalidades leves por conduzirem a projetos menos econômicos e eficientes.

Ao final da análise, o somatório dos pontos de demérito para todo o banco de dados permite uma avaliação global: quanto menor a pontuação total, mais preciso e confiável é o modelo normativo analisado.

3 METODOLOGIA

A presente pesquisa caracteriza-se como um estudo teórico-analítico e comparativo, fundamentado na análise de dados experimentais preexistentes na literatura técnica para avaliar a segurança dos modelos de cálculo de cisalhamento. Para viabilizar a análise comparativa, foi estruturado um banco de dados robusto, composto por 176 vigas de concreto armado submetidas a esforços de cisalhamento até a ruptura, coletadas a partir de ensaios clássicos disponíveis na literatura internacional.

Calculou-se a resistência última ao cisalhamento teórica ($V_{u,teo}$) para cada uma das 176 vigas do banco de dados, aplicando-se as equações prescritas pelas normas objeto de estudo. É importante ressaltar que, para fins de comparação direta com os resultados experimentais ($V_{u,exp}$), os cálculos foram realizados sem a aplicação dos coeficientes de ponderação das resistências e das ações, trabalhando-se com os valores nominais.

A validação dos modelos normativos foi realizada através da confrontação entre a carga última experimental e a carga teórica prevista. A análise dos resultados baseou-se em duas abordagens principais. Primeiramente, realizou-se uma análise estatística descritiva, determinando a média, o desvio padrão e o coeficiente de variação (CV) da razão $V_{u,exp} / V_{u,teo}$ para cada norma, permitindo avaliar a precisão e a tendência de segurança global de cada modelo. Posteriormente, aplicou-se o critério de confiabilidade proposto por Collins (2001), conhecido como sistema de Classificação por Pontos de Demérito (*Demerit Points Classification* - DPC).

4 BANCO DE DADOS

O banco de dados utilizado foi elaborado a partir da compilação de resultados experimentais observado de Costa (2022) a qual a parti de diversos estudos de vigas de concreto armado submetidas ao cisalhamento construiu dois bancos de dados para estudos de cisalhamento. Para cada viga analisada, foram coletadas as dimensões geométricas, propriedades mecânicas do concreto, características das armaduras e os valores de resistência última obtidos em ensaios laboratoriais.

Tabela 2 - Resumo do Banco de dados.

Autor	nº de Espécimes	bw (mm)	d (mm)	a/d	fc (MPa)	fct (MPa)	dmax (mm)	pl (mm)
1	6	290 - 360	178 - 278	2,9 - 4,5	46 - 59	3,7 - 4,2	19	1,0 - 3,0
2	16	127	184 - 208	2,7 - 4,0	62 - 69	4,3 - 4,5	12,7	2,2 - 6,6
3	7	300	925	2,9	21 - 80	2,0 - 4,7	10	0,5 - 2,0
4	8	240	600 - 1200	3	23 - 30	2,2 - 2,6	30	0,6 - 1,3
5	3	203	356	3	33 - 39	2,8 - 3,2	10,0 - 20,0	1,7
6	6	300	925	2,9	36 - 98	3,0 - 5,1	10	1
7	11	178	267 - 273	4	21 - 79	2,0 - 4,7	12,7	0,9 - 3,2
8	12	300	146 - 746	3,5 - 3,9	90 - 111	4,9 - 5,3	16	0,8 - 4,2
9	19	150 - 163	191 - 196	3,6 - 3,7	31 - 86	2,7 - 4,8	18	2,2 - 4,1
10	17	150	203 - 207	2,9 - 4,0	26 - 83	2,4 - 4,8	10	2,0 - 3,2
11	30	151 - 156	133 - 1097	2,4 - 8	25 - 30	2,4 - 2,6	19	2,6 - 2,8
12	3	102	152	3,5 - 5,0	41 - 44	3,3 - 3,5	9,5	1,4
13	3	500	225 - 226	2,5 - 3,5	25 - 26	2,3 - 2,4	16	0,8 - 1,4
14	4	150	160 - 165	3,0 - 4,0	85	4,8	16	1,9 - 4,1
15	3	200	362 - 372	3,0 - 4,0	81 - 97	4,7 - 5,0	16	0,8 - 1,9
16	16	150 - 300	207 - 442	3,0 - 4,0	54 - 98	4,1 - 5,1	16	1,8 - 3,2
17	1	300	1890	3	34	2,9	10	0,7
18	11	150	115 - 395	2,7 - 3,1	21 - 25	2,1 - 2,3	12,5 - 19	3,18 - 3,64

Fonte: Adaptado de Costa (2022).

O banco de dados serve como base para uma avaliação crítica das diferenças entre os modelos normativos e sua capacidade de representar o comportamento real das vigas ensaiadas. Além disso, possibilita identificar tendências, limitações e particularidades de cada norma, contribuindo para discussões relacionadas à

segurança estrutural, calibração de modelos teóricos e aprimoramento das prescrições normativas para o cisalhamento.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise dos resultados obtidos a partir do banco de dados composto por 176 vigas de concreto armado confronta as resistências últimas de cisalhamento observadas experimentalmente ($V_{u,exp}$) com as resistências teóricas ($V_{u,teo}$) estimadas pelas normas ABNT NBR 6118 (2014), Eurocode 2 (2004) e ACI 318 (2019). A discussão fundamenta-se na análise estatística descritiva e na avaliação da confiabilidade estrutural segundo o critério de Collins (DPC), permitindo uma compreensão aprofundada do desempenho de cada modelo normativo.

5.1 Análise estatística e comparativa

A Tabela 3 resume os parâmetros estatísticos fundamentais da razão $V_{u,exp} / V_{u,teo}$ para os três modelos normativos analisados.

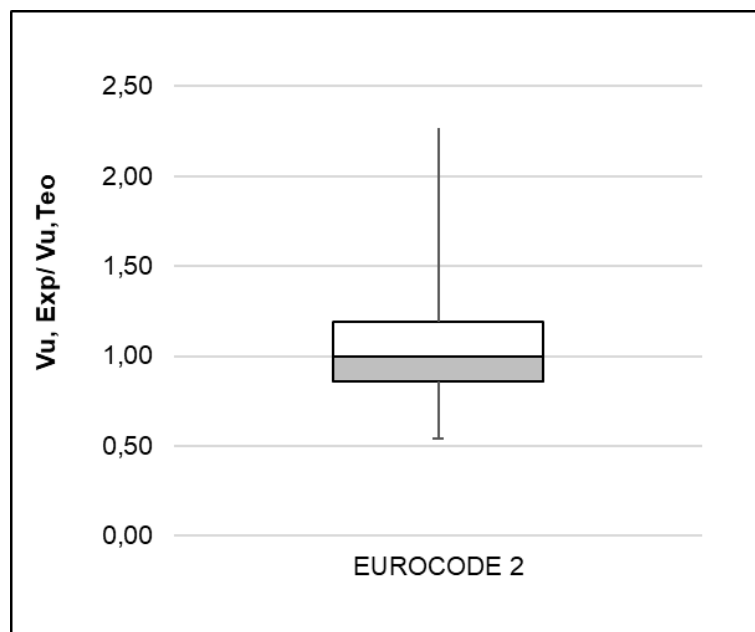
Tabela 3 – Resumo Estatístico da Razão $V_{u,exp} / V_{u,teo}$

Parâmetro Estatístico	ACI 318	Eurocode 2	NBR 6118
Média	1,42	1,07	1,12
Desvio Padrão	0,47	0,32	0,60
Coeficiente de Variação (COV)	33,0%	30,0%	53,0%

Fonte: Adaptado de Costa (2022).

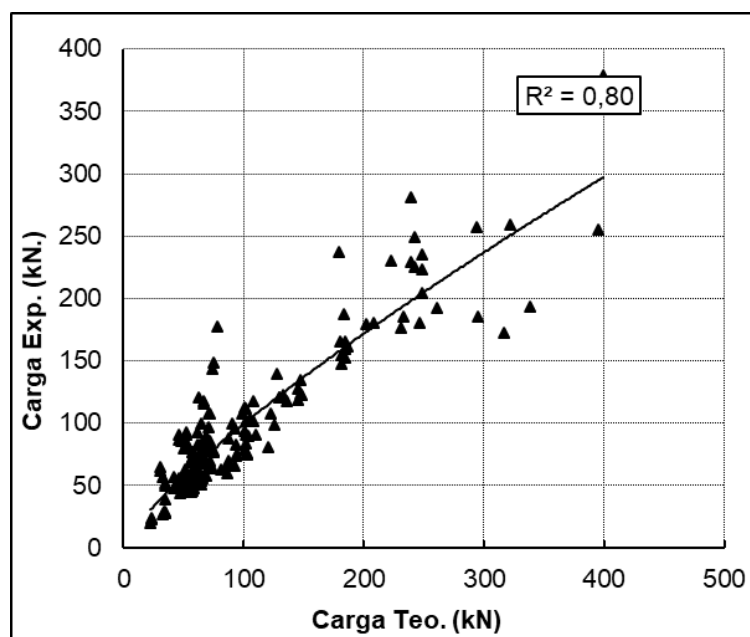
A análise dos dados revela que o modelo do Eurocode 2 apresentou o melhor desempenho global em termos de segurança média, com um valor de 1,07. Isso indica que, em média, as previsões da norma europeia são muito próximas da realidade experimental, com uma leve tendência a favor da segurança. O Coeficiente de Variação (CV) de 30,0% demonstra uma dispersão moderada, sendo a mais baixa entre as normas analisadas, o que sugere um modelo consistente no tratamento das variáveis.

Figura 3 - Correlação entre os dados experimentais e normativo da Eurocode 2.



Fonte: Autoria Própria (2025).

Figura 4 - Dispersão entre os resultados experimentais e normativo da Eurocode 2.

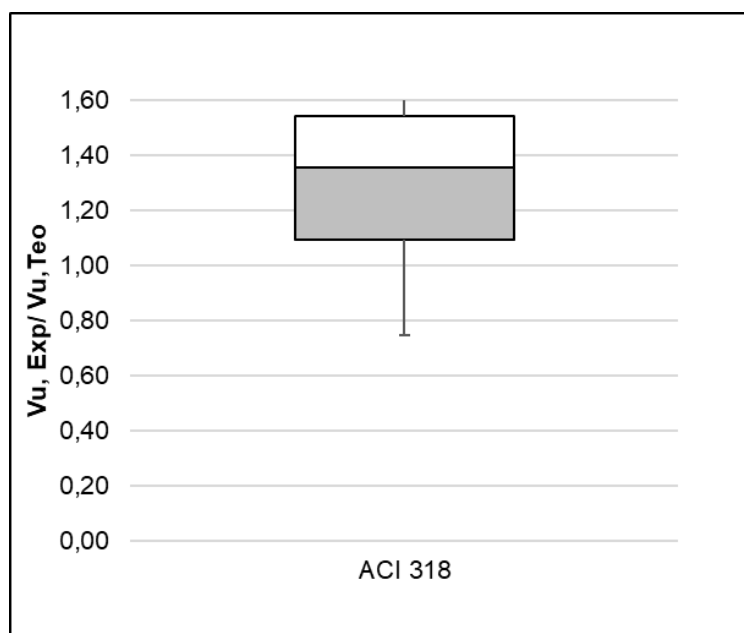


Fonte: Autoria Própria (2025).

A ACI 318 mostrou-se consistentemente inseguro em termos nominais, apresentando a maior média do grupo (1,42). Isso significa que, para a maioria das vigas analisadas, o modelo americano previu uma resistência inferior àquela que foi efetivamente observada nos ensaios. No entanto, destacou-se por apresentar uma dispersão dos dados (CV de 33,0%), próximo ao da europeia, o que sugere que o erro do modelo é sistemático e previsível, podendo ser corrigido através de coeficientes de

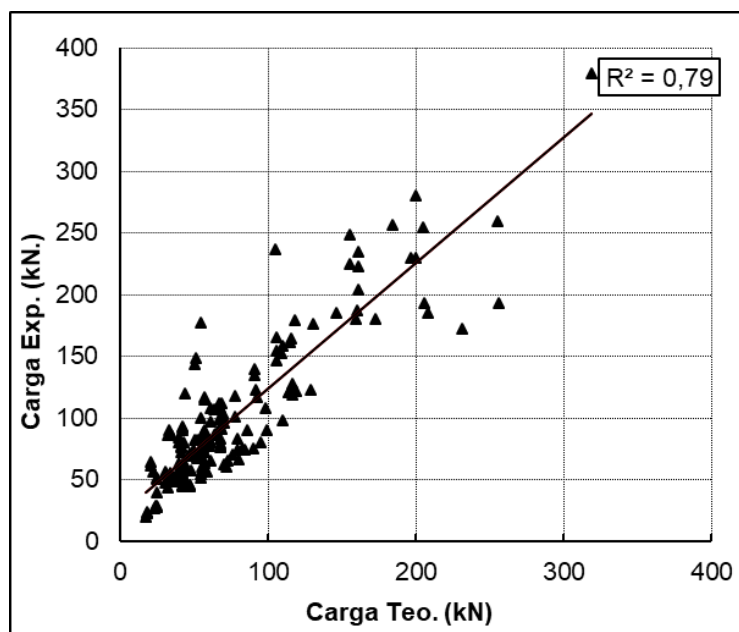
segurança adequados.

Figura 5 - Correlação entre os dados experimentais e normativo da ACI 318.



Fonte: Autoria Própria (2025).

Figura 6 - Dispersão entre os resultados experimentais e normativo da ACI 318.

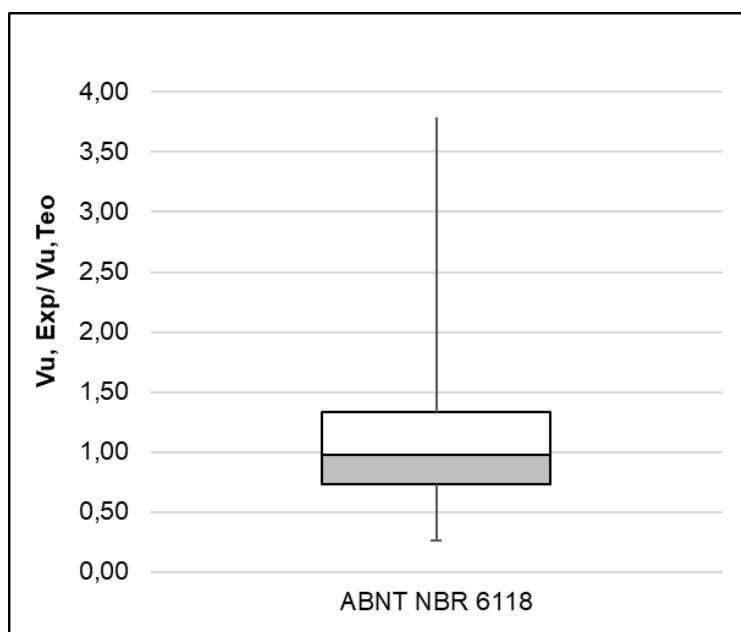


Fonte: Autoria Própria (2025).

A norma brasileira NBR 6118 apresentou resultados que inspiram cuidados quanto à consistência. Embora sua média (1,12) seja próxima à do Eurocode, ela ainda se situa na zona de insegurança. O fator mais crítico, contudo, foi a elevada dispersão dos resultados, evidenciada pelo maior desvio padrão (0,60) e pelo maior

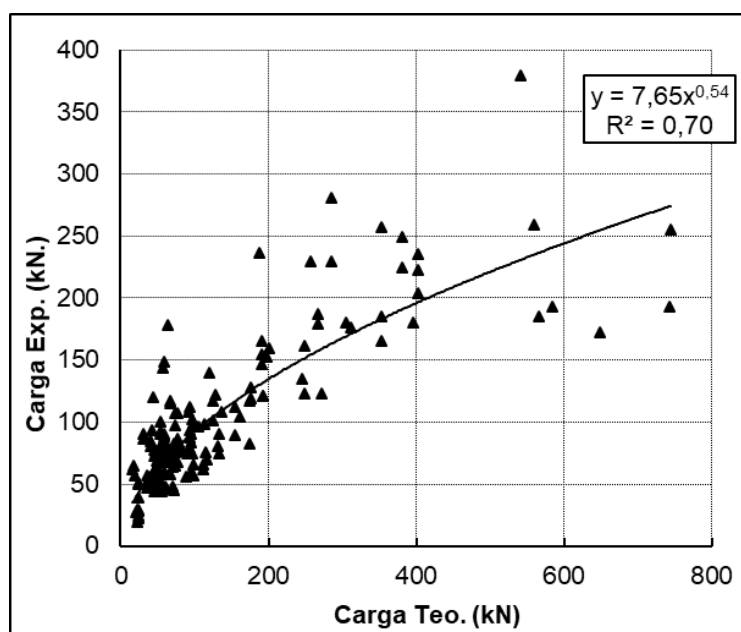
Coefficiente de Variação (CV de 53,0%) entre todas as normas avaliadas. Essa alta variabilidade indica uma falta de robustez do modelo para lidar com diferentes configurações geométricas e de materiais, resultando em previsões ora muito conservadoras, ora extremamente perigosas.

Figura 7 - Correlação entre os dados experimentais e normativo da NBR 6118.



Fonte: Autoria Própria (2025).

Figura 8 - Dispersão entre os resultados experimentais e normativo da NBR 6118.



Fonte: Autoria Própria (2025).

5.2 Avaliação da confiabilidade (critério de collins)

Para uma análise mais rigorosa da segurança, aplicou-se o sistema de Classificação por Pontos de Demérito (DPC), que penaliza severamente as previsões inseguras.

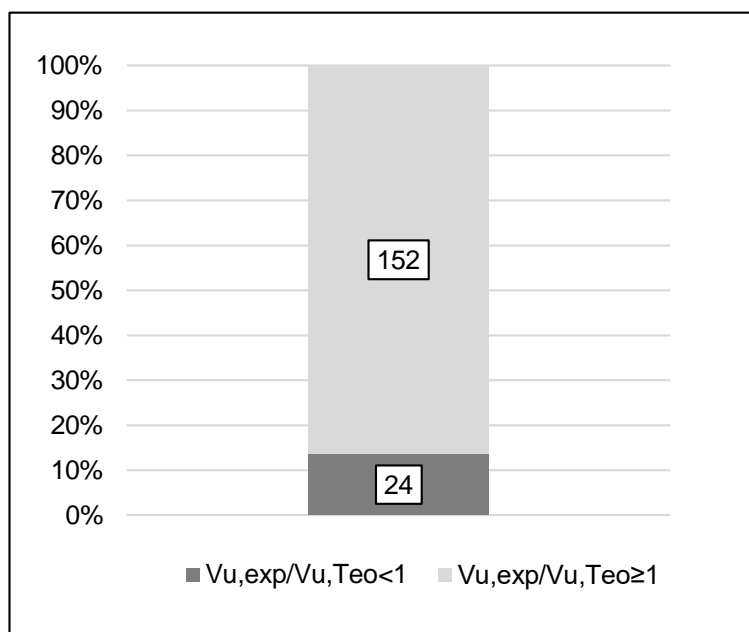
O Eurocode 2 demonstrou ser o modelo mais equilibrado. Sua média próxima à 1 e seu menor coeficiente de variação (30,0%) refletem-se numa distribuição de pontos de demérito mais favorável nas faixas de "Segurança Adequada". A formulação europeia demonstrou capacidade de evitar erros grosseiros contra a segurança, mantendo um nível de precisão adequado para a prática de engenharia.

Tabela 4 – Resumo Estatístico da Razão $V_{u,exp} / V_{u,teo}$

Modelo	EC-2	
$V_{u,exp} / V_{u,Teo}$	Nº de peças	Penal.
< 0.50	0	0
[0,50~0,8]	22	110
[0,8~1,1]	92	0
[1,1~2,0[59	59
≥ 2.0	3	6
Total	176	175

Fonte: Autoria Própria (2025).

Figura 9 - Histograma comparativo da classificação de segurança das vigas segundo o critério de Collins (DPC) para os modelos da Eurocode 2.



Fonte: Autoria Própria (2025).

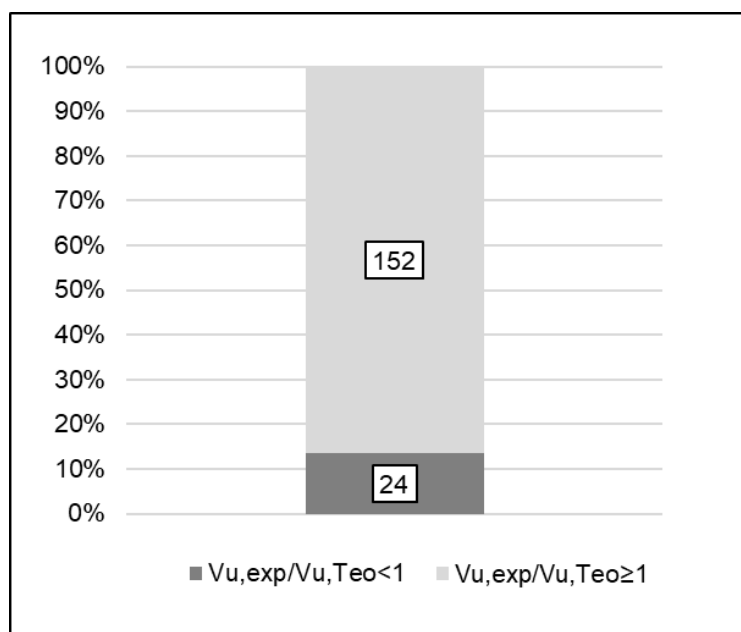
O ACI 318 confirmou-se como um modelo extremamente seguro. Devido à sua média elevada (1,42), a maior parte dos seus resultados concentrou-se nas faixas de "Conservador" e "Extremamente Conservador". Embora isso garanta a segurança estrutural (evitando colapsos frágeis), a alta incidência de previsões conservadoras resulta em penalidades leves no sistema DPC, indicando que o modelo pode ser antieconômico em diversas situações.

Tabela 5 – Resumo Estatístico da Razão $V_{u,exp} / V_{u,teo}$

Modelo	ACI 318	
$V_{u, exp} / V_{u, Teo}$	Nº de peças	Penal.
< 0.50	0	0
[0,50~0,8]	2	10
[0,8~1,1]	43	0
[1,1~2,0[111	111
≥ 2.0	20	40
Total	176	161

Fonte: Autoria Própria (2025).

Figura 10 - Histograma comparativo da classificação de segurança das vigas segundo o critério de Collins (DPC) para os modelos da ACI 318.



Fonte: Autoria Própria (2025).

A aplicação do critério de Collins expõe de forma clara as deficiências de segurança da norma brasileira para o banco de dados analisado. A NBR 6118 obteve a pior pontuação global, acumulando 412 pontos de demérito. O dado mais alarmante é a incidência de 41 vigas classificadas como "Extremamente Perigosas" (onde

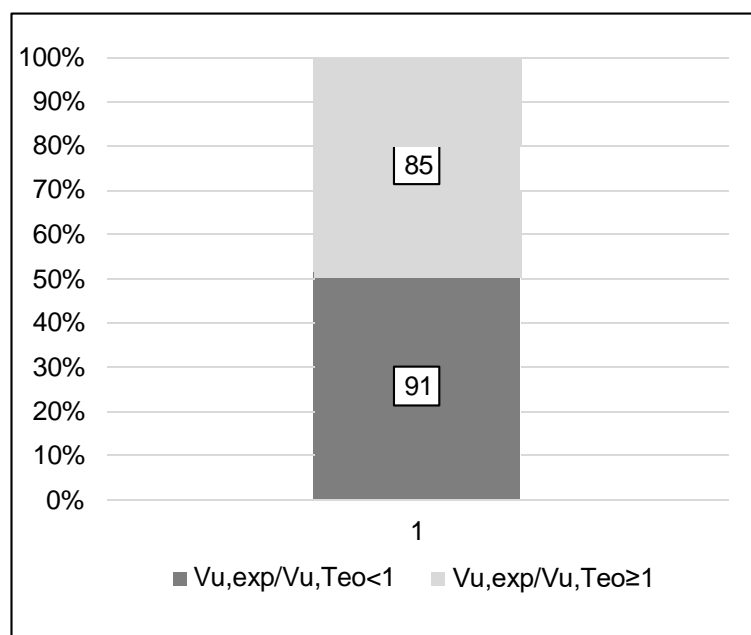
a resistência real foi menos da metade da prevista), representando cerca de 23% da amostra total. Esse comportamento errático confirma a alta dispersão observada na análise estatística e sugere que o modelo pode ser inadequado para certas faixas de parâmetros sem os devidos fatores de correção.

Tabela 6 – Resumo Estatístico da Razão $Vu,exp / Vu,teo$

Modelo	NBR 6118	
$Vu, exp/ Vu, Teo$	Nº de peças	Penal.
< 0.50	11	110
[0,50~0,8]	43	215
[0,8~1,1]	49	0
[1,1~2,0[59	59
≥ 2.0	14	28
Total	176	412

Fonte: Autoria Própria (2025).

Figura 11 - Histograma comparativo da classificação de segurança das vigas segundo o critério de Collins (DPC) para os modelos da NBR 6118.



Fonte: Autoria Própria (2025).

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como objetivo central analisar a segurança e a confiabilidade dos modelos de cálculo de resistência ao cisalhamento em vigas de concreto armado com armadura transversal, confrontando as prescrições das normas ABNT NBR 6118:2014, Eurocode 2 (2004) e ACI 318-19 com um banco de dados experimental composto por 176 vigas. A motivação para este estudo reside na natureza frágil e brusca da ruptura por esforço cortante, o que exige dos modelos normativos não apenas precisão, mas, sobretudo, uma margem de segurança robusta que previna o colapso sem aviso prévio. A metodologia empregada, que combinou a análise estatística descritiva com o sistema de Classificação por Pontos de Demérito (DPC) fundamentado nos critérios de Collins, permitiu uma avaliação profunda não apenas da média de acertos, mas das penalidades associadas a previsões inseguras, revelando disparidades significativas no desempenho dos três códigos analisados.

A avaliação do modelo proposto pela norma brasileira ABNT NBR 6118, apresentou os resultados mais instáveis desta pesquisa. Sob a ótica estatística, a norma registrou uma média da razão entre a resistência experimental e a calculada de 1,12, indicando que, em média, o modelo se situa numa zona de segurança. No entanto, o fator crítico não foi a média, mas sim a excessiva dispersão dos resultados, evidenciada por um Coeficiente de Variação de 53,0%, o mais alto entre todas as normas comparadas. Esta inconsistência foi corroborada pela análise de confiabilidade via DPC, onde a norma acumulou a maior pontuação de demérito (412 pontos). O dado mais alarmante revelado pelo estudo foi a classificação de 11 vigas na categoria "Extremamente Perigosa", o que significa que, apesar da média satisfatória, o modelo falhou gravemente em prever a resistência para uma parcela significativa da amostra (cerca de 23%). Tais resultados sugerem que a formulação simplificada do Modelo I, ao não incorporar fatores de correção eficientes para parâmetros como o efeito de escala, perde robustez quando aplicada a um universo amplo de geometrias, comprometendo a confiabilidade em situações específicas.

Em contrapartida, a análise do Eurocode 2, que fundamenta seu cálculo no modelo de treliça com ângulo variável, revelou o comportamento mais preciso mecanicamente. Estatisticamente, o modelo apresentou uma média de segurança de 1,07, valor muito próximo da unidade, o que indica uma excelente correlação entre

a previsão teórica e o comportamento real da estrutura. Essa precisão foi acompanhada pelo menor Coeficiente de Variação registrado (30,0%), demonstrando que o modelo teórico europeu é consistente e captura bem os fenômenos físicos envolvidos, como

o engrenamento de agregados e a inclinação das bielas. Na análise de confiabilidade, o Eurocode 2 obteve um desempenho intermediário (175 pontos de demérito), penalizado majoritariamente pela concentração de resultados na faixa "Perigosa" (110 vigas), mas com poucos casos extremos. Conclui-se que o modelo europeu é o mais racional, mas sua aplicação requer atenção aos coeficientes de segurança para garantir que a dispersão natural não leve a resultados contra a segurança.

O desempenho mais conservador e robusto foi observado na aplicação da norma americana ACI 318. Este código, que utiliza uma abordagem semi-empírica fundamentada na Teoria do Campo de Compressão Modificada, obteve a maior média de segurança (1,42), indicando uma tendência forte ao conservadorismo. Com um Coeficiente de Variação de 33,0%, próximo ao do modelo europeu, sua formulação provou-se extremamente eficaz em evitar erros grosseiros contra a segurança. A aplicação do critério de Collins confirmou a superioridade do ACI 318 neste contexto de prevenção de colapso, atribuindo-lhe a menor pontuação de demérito (161 pontos) e, mais importante, não registrando nenhum caso na faixa "Extremamente Perigosa". A maior parte das suas previsões situou-se nas faixas de "Segurança Adequada" ou "Conservador", validando a eficiência dos seus fatores de ajuste empíricos para mitigar os riscos de ruptura frágil.

Em síntese, este trabalho permite concluir que, para o banco de dados de vigas com armadura transversal analisado, o modelo do ACI 318 oferece a maior garantia de segurança estrutural, priorizando a proteção contra a ruptura frágil, ainda que às custas de um maior conservadorismo. O Eurocode 2 mostrou-se a ferramenta mais precisa para estimar a resistência real, enquanto a norma brasileira NBR 6118, em seu Modelo I, demonstrou uma fragilidade excessiva devido à sua alta variabilidade. A presença significativa de resultados extremamente perigosos no modelo nacional indica a urgência de revisões que considerem a adoção de fatores de correção para o efeito de escala ou a migração para modelos mais refinados, garantindo que a prática brasileira se alinhe aos padrões internacionais de confiabilidade e robustez. A pesquisa reforça a importância de não se avaliar modelos de cálculo apenas pela média de seus acertos, mas principalmente pela

sua capacidade de evitar falhas catastróficas, critério no qual a norma nacional carece de aprimoramento frente aos padrões internacionais.

REFERÊNCIAS

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8681**: ações e segurança nas estruturas. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Building code requirements for structural concrete and commentary (ACI 318M-25)**. Farmington Hills: ACI, 2025.

BENTZ, E. C.; COLLINS, M. P. Development of the 2004 Canadian code provisions for shear in concrete. **Canadian Journal of Civil Engineering**, v. 35, n. 4, p. 326-341, 2008.

CARVALHO, R. C.; FIGUEIREDO FILHO, J. R. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado**. 4. ed. São Carlos: EdUFSCar, 2014. v. 1.

COLLINS, M. P. Evaluation of shear design procedures for concrete structures. **ACI Structural Journal**, v. 98, n. 4, p. 559-568, 2001.

COLLINS, M. P.; MITCHELL, D. **Prestressed concrete structures**. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1991.

COSTA, Natasha Cristina da Silva. **Influência do fator de escala, diâmetro máximo e tipo de agregado graúdo na resistência ao cisalhamento de vigas de concreto armado sem armadura de cisalhamento**. 2022. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Pará, Belém, 2022.

EUROCODE 2. **Design of concrete structures – part 1-1**: general rules and rules for buildings. London: British Standards Institution, 2004.

FUSCO, Péricles Brasiliense. **Técnica de armar as estruturas de concreto**. São Paulo: Pini, 1995.

ANEXOS A – Banco de Dados

Tabela 7.1 – Banco de Dados

	Autor	Espécime	Dimensões				Propriedades Concreto			Taxas de Armadura			Experimenta	Previsão Normativa (Vu)			Relação Vu,exp/Vu,teo		
			b	h	d	a/d	f_c	f_{ctd}	Agregado	As	rL	fys		Vu	ACI-318	EC-2	NBR	ACI-318	EC-2
							(MPa)	(Mpa)	dMax	L	%	MPa	kN	KN	KN	KN			
			(mm)	(mm)	(mm)			(mm)	mm ²				KN	KN	KN				
1	(1) Adebar, Collins (1996)	ST1	360	310	278	2,88	52,50	4,02	19,0	1570	1,57	536	127,53	116,6	144,9	176,8	1,1	0,9	0,7
2		ST2	360	310	278	2,88	52,50	4,02	19,0	1570	1,57	536	118,67	116,6	144,9	176,8	1,0	0,8	0,7
3		ST3	290	310	278	2,88	49,30	3,83	19,0	1570	1,95	536	107,72	97,8	122,8	136,6	1,1	0,9	0,8
4		ST8	290	310	278	2,88	46,20	3,66	19,0	1570	1,95	536	80,61	94,7	120,2	130,8	0,9	0,7	0,6
5		ST16	290	310	178	4,49	51,50	3,96	19,0	1570	3,04	536	75,11	82,5	103,2	90,0	0,9	0,7	0,8
6		ST23	290	310	278	2,88	58,90	4,23	19,0	800	0,99	536	89,89	85,4	104,1	153,8	1,1	0,9	0,6
7	(2) Ahmad, Kahloo (1986)	A1	127	254	203	4,00	62,40	4,33	12,7	1013	3,93	414	57,82	48,0	57,9	51,1	1,2	1,0	1,1
8		A2	127	254	203	3,00	62,40	4,33	12,7	1013	3,93	414	68,94	48,0	57,9	51,1	1,4	1,2	1,3
9		A3	127	254	203	2,70	62,40	4,33	12,7	1013	3,93	414	68,94	48,0	57,9	51,1	1,4	1,2	1,3
10		A8	127	254	208	3,00	62,40	4,33	12,7	467	1,77	414	48,93	37,5	45,2	52,4	1,3	1,1	0,9
11		B1	127	254	202	4,00	68,70	4,48	12,7	1289	5,02	414	51,21	54,5	64,6	54,2	0,9	0,8	0,9
12		B2	127	254	202	3,00	68,70	4,48	12,7	1289	5,02	414	68,94	54,5	64,6	54,2	1,3	1,1	1,3
13		B3	127	254	202	2,70	68,70	4,48	12,7	1289	5,02	414	100,08	54,5	64,6	54,2	1,8	1,5	1,8
14		B7	127	254	208	4,00	68,70	4,48	12,7	594	2,25	414	44,48	42,6	50,5	55,8	1,0	0,9	0,8
15		B8	127	254	208	3,00	68,70	4,48	12,7	594	2,25	414	46,70	42,6	50,5	55,8	1,1	0,9	0,8
16		B9	127	254	208	2,70	68,70	4,48	12,7	594	2,25	414	80,06	42,6	50,5	55,8	1,9	1,6	1,4
17		C1	127	254	184	4,00	66,00	4,41	12,7	1552	6,64	414	54,27	54,5	65,3	48,1	1,0	0,8	1,1
18		C2	127	254	184	3,00	66,00	4,41	12,7	1552	6,64	414	75,62	54,5	65,3	48,1	1,4	1,2	1,6
19		C3	127	254	184	2,70	66,00	4,41	12,7	1552	6,64	414	68,94	54,5	65,3	48,1	1,3	1,1	1,4
20		C7	127	254	207	4,00	66,00	4,41	12,7	855	3,25	414	45,37	47,1	56,2	54,1	1,0	0,8	0,8
21		C8	127	254	207	3,00	66,00	4,41	12,7	855	3,25	414	44,48	47,1	56,2	54,1	0,9	0,8	0,8
22	C9	127	254	207	2,70	66,00	4,41	12,7	855	3,25	414	45,37	47,1	56,2	54,1	1,0	0,8	0,8	
23	(3) Angelakos, Bentz, Collins (2001)	DB120	300	1000	925	2,92	21,00	2,00	10,0	2800	1,01	550	179,00	118,3	202,5	266,1	1,5	0,9	0,7
24		DB130	300	1000	925	2,92	32,00	2,79	10,0	2800	1,01	550	185,00	146,0	233,0	352,4	1,3	0,8	0,5
25		DB140	300	1000	925	2,92	38,00	3,17	10,0	2800	1,01	550	180,00	159,1	246,8	395,2	1,1	0,7	0,5
26		DB165	300	1000	925	2,92	65,00	4,39	10,0	2800	1,01	550	185,00	208,1	295,1	565,3	0,9	0,6	0,3
27		DB180	300	1000	925	2,92	80,00	4,72	10,0	2800	1,01	550	172,00	230,9	316,3	649,2	0,7	0,5	0,3
28		DB230	300	1000	925	2,92	32,00	2,79	10,0	5600	2,02	550	257,00	184,0	293,6	352,4	1,4	0,9	0,7
29	DBO530	300	1000	925	2,92	32,00	2,79	10,0	1400	0,50	550	165,00	115,9	184,9	352,4	1,4	0,9	0,5	
30	(4) Bhal (1968)	B1	240	350	300	3,00	23,20	2,16	30,0	904	1,26	434	70,14	50,7	72,4	73,8	1,4	1,0	1,0
31		B2	240	650	600	3,00	29,60	2,62	30,0	1808	1,26	434	117,23	92,2	136,4	173,6	1,3	0,9	0,7
32		B3	240	950	900	3,00	27,50	2,48	30,0	2712	1,26	434	161,87	114,6	186,3	248,0	1,4	0,9	0,7
33		B4	240	1250	1200	3,00	25,20	2,31	30,0	3616	1,26	434	176,58	130,2	230,9	311,9	1,4	0,8	0,6
34		B5	240	650	600	3,00	26,60	2,41	30,0	904	0,63	434	103,99	69,4	104,5	161,7	1,5	1,0	0,6
35		B6	240	650	600	3,00	24,70	2,28	30,0	904	0,63	430	111,83	66,8	102,0	153,9	1,7	1,1	0,7
36		B7	240	950	900	3,00	27,20	2,46	30,0	1356	0,63	434	134,89	90,4	147,3	246,2	1,5	0,9	0,5
37		B8	240	950	900	3,00	27,70	2,49	30,0	1356	0,63	430	122,63	91,3	148,2	249,2	1,3	0,8	0,5

Fonte: Autoria Própria (2025).

Tabela 7.1 – Banco de Dados. Continuação

38	(5) Chana (1981)	37623	203	406	356	3,00	38,90	3,23	20,0	1257	1,74	478	96,00	70,0	92,7	104,5	1,4	1,0	0,9
39		37654	203	406	356	3,00	32,80	2,84	10,0	1257	1,74	478	87,40	64,3	87,6	93,3	1,4	1,0	0,9
40		37682	203	406	356	3,00	35,70	3,02	20,0	1257	1,74	478	99,40	67,1	90,1	98,7	1,5	1,1	1,0
41	(6) Collins, Kuchma (1999)	B100	300	1000	925	2,92	36,00	3,04	10,0	2800	1,01	550	225,00	154,9	242,3	381,2	1,5	0,9	0,6
42		B100H	300	1000	925	2,92	98,00	5,07	10,0	2800	1,01	550	193,00	255,6	338,4	743,2	0,8	0,6	0,3
43		B100B	300	1000	925	2,92	39,00	3,23	10,0	2800	1,01	550	204,00	161,2	248,9	402,1	1,3	0,8	0,5
44		B100L	300	1000	925	2,92	39,00	3,23	10,0	2800	1,01	483	223,00	161,2	248,9	402,1	1,4	0,9	0,6
45		B100-R	300	1000	925	2,92	36,00	3,04	10,0	2800	1,01	550	249,00	154,9	242,3	381,2	1,6	1,0	0,7
46		B100L-R	300	1000	925	2,92	39,00	3,23	10,0	2800	1,01	483	235,00	161,2	248,9	402,1	1,5	0,9	0,6
47	7) Elzanaty, Nilson, Slate (1986)	F1	178	305	270	4,0	65,50	4,40	12,7	570	1,19	434	57,38	57,4	68,7	98,4	1,0	0,8	0,6
48		F2	178	305	268	4,0	65,50	4,40	12,7	1164	2,44	434	65,61	72,6	86,9	97,7	0,9	0,8	0,7
49		F10	178	305	267	4,0	65,50	4,40	12,7	1520	3,20	434	74,86	79,2	94,8	97,3	0,9	0,8	0,8
50		F9	178	305	268	4,0	79,30	4,71	12,7	776	1,63	434	62,27	69,8	80,9	110,9	0,9	0,8	0,6
51		F15	178	305	268	4,0	79,30	4,71	12,7	1164	2,44	434	66,23	79,9	92,6	110,9	0,8	0,7	0,6
52		F6	178	305	268	6,0	63,40	4,35	12,7	1164	2,44	434	60,05	71,4	85,9	95,6	0,8	0,7	0,6
53		F11	178	305	270	4,0	20,70	1,97	12,7	570	1,19	434	43,72	32,3	46,8	45,7	1,4	0,9	1,0
54		F12	178	305	268	4,0	20,70	1,97	12,7	1164	2,44	434	53,15	40,8	59,2	45,3	1,3	0,9	1,2
55		F8	178	305	273	4,0	40,00	3,29	12,7	451	0,93	434	44,70	41,7	54,2	71,6	1,1	0,8	0,6
56		F13	178	305	270	4,0	40,00	3,29	12,7	570	1,19	434	47,59	44,9	58,3	70,8	1,1	0,8	0,7
57	F14	178	305	268	4,0	40,00	3,29	12,7	1164	2,44	434	63,38	56,7	73,7	70,3	1,1	0,9	0,9	
58	(8) Grimm (1997)	S1.1	300	200	153	3,73	90,10	4,92	16,0	616	1,34	660	70,10	76,1	87,6	116,2	0,9	0,8	0,6
59		S1.2	300	200	152	3,75	90,20	4,94	16,0	1010	2,21	517	75,80	89,5	103,0	115,6	0,8	0,7	0,7
60		S1.3	300	200	146	3,90	93,70	4,99	16,0	1850	4,22	487	98,60	109,5	125,6	113,9	0,9	0,8	0,9
61		S2.2	300	400	348	3,53	91,30	4,95	16,0	1960	1,88	469	187,10	160,0	183,5	266,7	1,2	1,0	0,7
62		S2.3	300	400	348	3,53	93,70	4,99	16,0	982	0,94	469	123,10	128,7	147,0	271,4	1,0	0,8	0,5
63		S2.4	300	400	328	3,75	94,10	5,00	16,0	3700	3,76	487	229,80	196,3	223,1	256,5	1,2	1,0	0,9
64		S3.2	300	800	718	3,66	93,70	4,99	16,0	3700	1,72	487	259,1	255,2	322,2	559,9	1,0	0,8	0,5
65		S3.3	300	800	746	3,53	94,40	5,00	16,0	1850	0,83	487	192,80	205,6	261,3	584,6	0,9	0,7	0,3
66		S3.4	300	800	690	3,81	94,40	5,00	16,0	7390	3,57	487	379,00	318,8	398,9	540,7	1,2	1,0	0,7
67		S4.1	300	200	153	3,73	110,90	5,29	16,0	616	1,34	660	74,20	84,4	93,8	133,5	0,9	0,8	0,6
68		S4.2	300	200	152	3,75	110,90	5,29	16,0	1010	2,21	517	90,30	99,3	110,4	132,6	0,9	0,8	0,7
69	S4.3	300	200	146	3,90	110,90	5,29	16,0	1850	4,22	487	122,30	119,1	132,9	127,4	1,0	0,9	1,0	

Fonte: Autoria Própria (2025).

Tabela 7.1 – Banco de Dados. Continuação

70	(9) Hallgren (1994)	B90SB13-2-86	163	233	192	3,65	86,20	4,85	18,0	678	2,17	630	82,50	56,9	65,1	76,9	1,5	1,3	1,1
71		B90SB14-2-86	158	235	194	3,61	86,20	4,85	18,0	678	2,21	630	76,50	56,0	64,0	75,4	1,4	1,2	1,0
72		B90SB22-2-86	158	234	193	3,63	84,60	4,82	18,0	678	2,22	630	75,50	55,3	63,5	74,0	1,4	1,2	1,0
73		B91SC2-2-62	155	237	196	3,57	61,80	4,31	18,0	678	2,23	443	69,50	47,0	56,8	59,8	1,5	1,2	1,2
74		B91SC4-2-69	156	236	195	3,59	69,10	4,49	18,0	678	2,23	443	74,00	49,8	59,1	64,5	1,5	1,3	1,1
75		B90SB17-2-44	157	232	191	3,66	44,90	3,59	18,0	678	2,26	630	59,00	39,9	50,9	47,7	1,5	1,2	1,2
76		B90SB18-2-44	155	235	194	3,61	44,90	3,59	18,0	678	2,25	630	63,00	39,9	50,8	47,9	1,6	1,2	1,3
77		B90SB21-2-86	155	235	194	3,61	84,60	4,82	18,0	678	2,25	630	69,00	54,7	62,8	73,0	1,3	1,1	0,9
78		B91SC1-2-62	156	234	193	3,63	61,80	4,31	18,0	678	2,25	443	71,00	46,9	56,7	59,3	1,5	1,3	1,2
79		B91SD1-4-61	156	247	194	3,61	60,80	4,29	18,0	1206	3,98	494	88,50	56,5	68,4	59,0	1,6	1,3	1,5
80		B91SD2-4-61	156	248	195	3,59	60,80	4,29	18,0	1206	3,96	494	90,00	56,6	68,6	59,3	1,6	1,3	1,5
81		B91SD3-4-66	156	248	195	3,59	65,70	4,41	18,0	1206	3,96	494	81,50	58,8	70,4	62,4	1,4	1,2	1,3
82		B91SD4-4-66	155	248	195	3,59	65,70	4,41	18,0	1206	3,99	494	79,00	58,6	70,1	62,0	1,3	1,1	1,3
83		B91SD5-4-58	156	249	196	3,57	58,30	4,22	18,0	1206	3,94	494	78,00	55,5	67,8	57,9	1,4	1,2	1,3
84		B91SD6-4-58	150	249	196	3,57	58,3	4,22	18,0	1206	4,10	494	82,50	54,1	66,0	55,7	1,5	1,2	1,5
85		B90SB5-2-33	156	232	191	3,66	32,8	2,84	18,0	678	2,28	651	56,00	34,0	45,7	38,5	1,6	1,2	1,5
86		B90SB6-2-33	156	235	194	3,61	32,8	2,84	18,0	678	2,24	651	53,50	34,2	46,0	39,1	1,6	1,2	1,4
87		B90SB9-2-31	156	233	192	3,65	31,1	2,73	18,0	678	2,26	651	49,00	33,2	45,0	37,3	1,5	1,1	1,3
88	B90SB10-2-31	157	234	193	3,63	31,1	2,73	18,0	667	2,20	651	53,50	33,2	45,0	37,8	1,6	1,2	1,4	
89	(10) Islam, Pam, Kwan (1998)	M100-S0	150	250	203	3,94	83,3	4,79	10,0	982	3,22	532	65,00	61,3	70,5	73,2	1,1	0,9	0,9
90		M100-S1	150	250	203	2,96	83,3	4,79	10,0	982	3,22	532	107,70	61,3	70,5	73,2	1,8	1,5	1,5
91		M100-S3	150	250	203	2,96	83,3	4,79	10,0	982	3,22	532	96,90	61,3	70,5	73,2	1,6	1,4	1,3
92		M100-S4	150	250	203	3,94	83,3	4,79	10,0	982	3,22	532	80,70	61,3	70,5	73,2	1,3	1,1	1,1
93		M80-S0	150	250	203	3,94	72,2	4,56	10,0	982	3,22	532	58,00	57,1	67,2	66,5	1,0	0,9	0,9
94		M80-S1	150	250	203	2,96	72,2	4,56	10,0	982	3,22	532	117,30	57,1	67,2	66,5	2,1	1,7	1,8
95		M80-S3	150	250	203	2,96	72,2	4,56	10,0	982	3,22	532	115,40	57,1	67,2	66,5	2,0	1,7	1,7
96		M80-S4	150	250	203	3,94	72,2	4,56	10,0	982	3,22	532	72,10	57,1	67,2	66,5	1,3	1,1	1,1
97		M60-S0	150	250	207	3,86	50,8	3,92	10,0	628	2,02	554	45,50	41,6	51,9	53,7	1,1	0,9	0,8
98		M60-S1	150	250	207	2,90	50,8	3,92	10,0	628	2,02	554	92,30	41,6	51,9	53,7	2,2	1,8	1,7
99		M60-S3	150	250	207	2,90	50,8	3,92	10,0	628	2,02	554	90,40	41,6	51,9	53,7	2,2	1,7	1,7
100		M60-S4	150	250	207	3,86	50,8	3,92	10,0	628	2,02	554	51,90	41,6	51,9	53,7	1,2	1,0	1,0
101		M40-S0	150	250	205	3,90	34,4	2,94	10,0	982	3,19	320	55,00	39,6	52,7	41,0	1,4	1,0	1,3
102		M40-S1	150	250	205	2,93	34,4	2,94	10,0	982	3,19	320	84,60	39,6	52,7	41,0	2,1	1,6	2,1
103		M40-S3	150	250	205	2,93	34,4	2,94	10,0	982	3,19	320	80,70	39,6	52,7	41,0	2,0	1,5	2,0
104		M25-S0	150	250	207	3,86	26,6	2,41	10,0	628	2,02	350	47,50	30,1	41,8	34,9	1,6	1,1	1,4
105	M25-S3	150	250	207	2,90	26,6	2,41	10,0	628	2,02	350	56,50	30,1	41,8	34,9	1,9	1,4	1,6	

Fonte: Autoria Própria (2025).

Tabela 7.1 – Banco de Dados. Continuação

106		3044	152	1219	1097	3,98	29,5	2,62	19,0	4555	2,73	376	159,02	109,7	185,0	200,6	1,4	0,9	0,8
107		3045	155	1219	1092	5,00	28,3	2,53	19,0	4568	2,70	381	152,34	108,8	184,6	198,1	1,4	0,8	0,8
108		3046	155	1219	1097	7,00	26,7	2,42	19,0	4594	2,70	360	154,12	106,0	181,8	191,4	1,5	0,8	0,8
109		3047	155	1219	1095	8,00	26,7	2,42	19,0	4555	2,68	376	147,01	105,7	181,1	191,0	1,4	0,8	0,8
110		63	154	610	543	4,00	26,2	2,39	19,0	2323	2,78	352	93,19	67,9	101,0	92,9	1,4	0,9	1,0
111		64	156	610	541	8,03	25,7	2,35	19,0	2323	2,75	352	78,95	67,8	101,0	92,6	1,2	0,8	0,9
112		66	156	610	541	6,01	26,4	2,40	19,0	2323	2,75	352	90,74	68,7	101,9	94,3	1,3	0,9	1,0
113		79	153	610	556	6,84	26,1	2,38	19,0	2316	2,72	381	83,62	68,0	101,5	94,3	1,2	0,8	0,9
114		1	152	610	524	3,11	27,3	2,46	19,0	2265	2,84	367	107,86	67,4	98,9	91,0	1,6	1,1	1,2
115		71	155	610	544	2,99	27,4	2,47	19,0	2245	2,66	373	102,08	69,0	101,9	96,6	1,5	1,0	1,1
116		52	152	152	138	3,93	24,8	2,29	19,0	568	2,71	392	28,89	23,5	33,8	22,5	1,2	0,9	1,3
117		48	151	152	133	5,09	24,8	2,28	19,0	568	2,83	392	27,11	23,0	33,2	21,5	1,2	0,8	1,3
118		81	153	305	274	5,93	27,5	2,48	19,0	1161	2,77	343	51,15	42,9	59,3	48,1	1,2	0,9	1,1
119		84	151	305	271	4,00	27,4	2,47	19,0	1161	2,84	342	55,39	42,2	58,4	46,9	1,3	0,9	1,2
120		96	153	305	275	3,94	25,3	2,32	19,0	1161	2,76	335	56,27	41,2	57,8	45,7	1,4	1,0	1,2
121	(11) Kani (1967)	83	156	305	271	3,00	27,4	2,47	19,0	1161	2,75	343	64,94	43,2	59,7	48,4	1,5	1,1	1,3
122		97	152	305	276	2,95	27,2	2,46	19,0	1129	2,69	366	62,49	42,2	58,5	47,8	1,5	1,1	1,3
123		3043	154	1219	1092	3,00	27,0	2,44	19,0	4555	2,71	376	165,02	105,7	180,8	190,7	1,6	0,9	0,9
124		56	153	152	137	3,46	27,2	2,46	19,0	561	2,68	403	28,00	24,5	34,8	23,9	1,1	0,8	1,2
125		58	152	152	138	3,44	27,2	2,46	19,0	561	2,67	417	28,91	24,5	34,7	23,9	1,2	0,8	1,2
126		60	155	152	139	2,93	26,8	2,43	19,0	568	2,64	392	39,30	24,8	35,3	24,3	1,6	1,1	1,6
127		91	154	305	269	6,06	27,4	2,47	19,0	1123	2,71	364	50,95	42,2	58,4	47,4	1,2	0,9	1,1
128		92	152	305	270	7,03	27,4	2,47	19,0	1123	2,74	369	45,84	41,9	58,0	47,0	1,1	0,8	1,0
129		41	152	152	141	2,41	27,2	2,46	19,0	561	2,62	381	51,44	24,8	35,0	24,4	2,1	1,5	2,1
130		59	154	152	140	2,67	26,6	2,42	19,0	568	2,63	392	50,15	24,7	35,1	24,2	2,0	1,4	2,1
131		65	150	610	552	2,46	27,0	2,44	19,0	2329	2,81	374	112,31	68,2	101,1	93,9	1,6	1,1	1,2
132		95	153	305	275	2,47	25,3	2,32	19,0	1161	2,76	338	72,73	41,2	57,8	45,7	1,8	1,3	1,6
133		98	153	305	275	2,47	26,2	2,39	19,0	1129	2,68	366	76,28	41,5	57,9	46,8	1,8	1,3	1,6
134		99	152	305	272	2,50	26,2	2,39	19,0	1129	2,73	366	77,17	41,2	57,4	46,0	1,9	1,3	1,7
135		3042	154	1219	1095	2,50	26,4	2,40	19,0	4555	2,70	375	236,86	104,6	179,7	188,4	2,3	1,3	1,3
136	(12) Kulkami, Shah (1998)	B4JL20-S	102	178	152	5,00	40,6	3,33	9,5	214	1,38	518	19,52	17,4	22,9	23,1	1,1	0,9	0,8
137		B3NO15-S	102	178	152	4,00	41,6	3,39	9,5	214	1,38	518	22,66	17,7	23,1	23,5	1,3	1,0	1,0
138		B3NO30-S	102	178	152	3,50	43,6	3,51	9,5	214	1,38	518	24,24	18,1	23,5	24,2	1,3	1,0	1,0
139	(13) Reineck, Koch, Schlaich (1978)	N8	500	250	226	3,50	25,8	2,36	16,0	887	0,78	501	101,50	77,2	107,6	124,3	1,3	0,9	0,8
140		N6	500	250	226	2,50	25,8	2,36	16,0	887	0,78	501	117,50	77,2	107,6	124,3	1,5	1,1	0,9
141		N7	500	250	225	2,50	24,6	2,27	16,0	1569	1,39	441	139,50	90,9	127,8	119,9	1,5	1,1	1,2
142	(14) Renmel (1991)	SL-1	150	200	165	4,00	85,1	4,83	16,0	462	1,87	523	46,28	43,9	50,7	60,3	1,1	0,9	0,8
143		SL-2	150	200	165	3,06	85,1	4,83	16,0	462	1,87	523	48,02	43,9	50,7	60,3	1,1	0,9	0,8
144		SL-4	150	200	160	4,00	84,5	4,81	16,0	982	4,09	474	57,60	55,4	64,2	58,2	1,0	0,9	1,0
145		SL-5	150	200	160	3,06	84,5	4,81	16,0	982	4,09	474	60,24	55,4	64,2	58,2	1,1	0,9	1,0

Fonte: Autoria Própria (2025).

