

RESSALVA

Atendendo a solicitação do autor, o texto completo desta dissertação será disponibilizado somente a partir de 26/01/2028

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

JOÃO VÍCTOR SANTANA

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE PILARES MISTOS
TUBULARES DE SEÇÃO RETANGULAR NÃO COMPACTA SUJEITOS A
COMPRESSÃO AXIAL**



**Ilha Solteira - SP
2026**

JOÃO VÍCTOR SANTANA

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE PILARES MISTOS
TUBULARES DE SEÇÃO RETANGULAR NÃO COMPACTA SUJEITOS À
COMPRESSÃO AXIAL**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira, para obtenção do título de Mestre.

Área de Concentração: Engenharia da Construção Civil

Orientador: Prof. Dr. Emerson Alexandro Bolandim

Coorientador: Prof. Dr. Eloi João Faria Figueiredo

Ilha Solteira - SP

2026

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

S232a Santana, João Víctor.
Análise do comportamento mecânico de pilares mistos tubulares de seção retangular não compacta sujeitos a compressão axial / João Víctor Santana. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2026
128 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Engenharia Da Construção Civil, 2026

Orientador: Emerson Alexandro Bolandim
Coorientador: Eloi João Faria Figueiredo
Inclui bibliografia

1. Pilares mistos tubulares de aço e concreto. 2. Seção não compacta. 3. Método dos elementos finitos. 4. Redes neurais artificiais.

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

A pesquisa em questão visa aprimorar o dimensionamento de pilares mistos retangulares não compactos, comparando e validando modelos numéricos e redes neurais frente às normas atuais. O estudo visa viabilizar a execução de estruturas mais eficientes e econômicas, otimizando o consumo de aço e concreto e mitigando riscos de falhas por instabilidade local.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

This research aims to improve the design of non-compact rectangular composite columns by comparing and validating numerical models and neural networks against current standards. The study aims to enable the construction of more efficient and economical structures, optimizing the consumption of steel and concrete and mitigating the risk of failures due to local instability.

IMPACTO POTENCIAL DE ESTA INVESTIGACIÓN

Esta investigación busca mejorar el diseño de columnas compuestas rectangulares no compactas mediante la comparación y validación de modelos numéricos y redes neuronales con las normas actuales. El estudio busca facilitar la construcción de estructuras más eficientes y económicas, optimizando el consumo de acero y hormigón y mitigando el riesgo de fallos por inestabilidad local.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Análise do comportamento mecânico de pilares mistos tubulares de seção retangular não compacta sujeitos a compressão axial

AUTOR: JOÃO VÍCTOR SANTANA


ORIENTADOR: EMERSON ALEXANDRO BOLANDIMCOORIENTADOR: ELÓI JOÃO FARIA FIGUEIREDO


Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil, área: Engenharia de Construção Civil pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. ELÓI JOÃO FARIA FIGUEIREDO (Participação Virtual)
Engenharia Mecânica / Universidade Lusófona de Humanidades e Tecnologias

Assinado por: **Elói João Faria Figueiredo**
Num. de Identificação: 11653881
Data: 2026.01.26 17:59:49 +0000

Prof. Dr. ALEX MICAEL DANTAS DE SOUSA (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia Civil / UNESP / Câmpus de Ilha Solteira - FEIS

Documento assinado digitalmente
 **ALEX MICAEL DANTAS DE SOUSA**
Data: 26/01/2026 21:38:56-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Documento assinado digitalmente
 **DAVI FAGUNDES LEAL**
Data: 26/01/2026 15:30:21-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. DAVI FAGUNDES LEAL (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia de Estruturas / Universidade de São Paulo

Ilha Solteira, 26 de janeiro de 2026.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, pela força e orientação constantes diante de todos os desafios superados nesta caminhada. Aos meus pais, João Martins e Noeli, e ao meu irmão, Luís Fernando, pelo apoio absoluto e pelo exemplo que me guia. À minha namorada, Thaynara, pelo incentivo e presença constante em todos os momentos. Aos amigos de Ilha Solteira que me acolheram, transformando o período de afastamento do lar em uma experiência de amizade e acolhimento.

Também aos meus orientadores Prof. Dr. Emerson Alexandro Bolandime Prof. Dr. Elói João Faria Figueiredo, pela orientação e pela oportunidade de aprendizado. À Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (FEIS/UNESP), bem como à CAPES pelo fomento à pesquisa por meio da bolsa concedida.

A todos que contribuíram para a minha formação e crescimento pessoal ao longo destes anos, meus sinceros agradecimentos.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001 (88887.914528/2023-00).

“Porque eu sou o SENHOR, teu Deus, que te segura pela tua mão direita e te diz: Não temas, eu te ajudo.” - Isaías 41:13).

RESUMO

O uso de pilares mistos de aço e concreto tubulares de seção retangular oferece vantagens estruturais significativas quanto à eficiência. Contudo, seções não compactas apresentam desafios quanto à instabilidade local e à diversidade de critérios normativos. Este trabalho investiga o comportamento mecânico e modos de falha quando submetidos à compressão axial. A metodologia compreendeu a revisão bibliográfica dos modos de falhas mais comuns e as normas NBR 8800 (2008 e 2024), AISC 360, EN 1994-1-1, CSA S16 e AS 5100.6, seguida pelo desenvolvimento de um modelo numérico via método dos elementos finitos (MEF) e aplicação de técnicas de aprendizado de máquina (Redes Neurais Artificiais). Para a calibração e validação, utilizou-se um banco de dados experimental com 180 ensaios filtrados de seções não compactas. Adicionalmente, foi conduzido um estudo paramétrico com 11.880 modelos numéricos para ampliar a investigação das variáveis geométricas e materiais. Os resultados indicaram que o modelo numérico calibrado superou previsões normativas, atingindo média de 1,03 (CV igual a 14%) e reduzindo a dispersão dos dados. As resistências analíticas (N_{Rk}) foram comparadas com as experimentais (N_u) e com os modelos numéricos. Entre os métodos analíticos, a NBR 8800:2008 demonstrou o melhor desempenho geral em média e menor coeficiente de variação, enquanto a AISC 360:22 e a NBR 8800:2024 apresentaram maior conservadorismo para seções de alta esbeltez local. As redes neurais de complexidade intermediária provaram ser ferramentas robustas e ágeis para a previsão da capacidade resistente.

Palavras-chave: pilares mistos tubulares de aço e concreto; seção não compacta; método dos elementos finitos; redes neurais artificiais.

ABSTRACT

The use of rectangular concrete-filled steel tubular (CFST) columns offers significant structural advantages regarding efficiency. However, non-compact sections present challenges related to local instability and the diversity of regulatory criteria. This work investigates the mechanical behavior and failure modes when subjected to axial compression. The methodology comprised a literature review of the most common failure modes and the standards NBR 8800 (2008 and 2024), AISC 360, EN 1994-1-1, CSA S16, and AS 5100.6, followed by the development of a numerical model via the finite element method (FEM) and the application of machine learning techniques (Artificial Neural Networks). For calibration and validation, an experimental database of 180 filtered tests of non-compact sections was used. Additionally, a parametric study with 11,880 numerical models was conducted to expand the investigation of geometric and material variables. The results indicated that the calibrated numerical model outperformed normative predictions, achieving an average of 1.03 (CV = 14%) and reducing data dispersion. Analytical strengths (N_{Rk}) were compared with experimental results (N_u) and numerical models. Among the analytical methods, NBR 8800:2008 demonstrated the best overall performance in terms of average and lower coefficient of variation, while AISC 360:22 and NBR 8800:2024 showed greater conservatism for sections with high local slenderness. Intermediate-complexity neural networks proved to be robust and agile tools for predicting load-bearing capacity.

Keywords: concrete-filled steel tubular columns; non-compact section; finite element method; artificial neural networks.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 — Tipos de seções para pilar misto de aço e concreto.....	20
Figura 2 — Fluxograma de análise para método analítico.....	26
Figura 3 — Fluxograma de análise para método numérico.....	26
Figura 4 — Distribuição das tensões residuais de tração (vermelho) e compressão (azul) em seção tubular de aço.....	30
Figura 5 — Ocorrência de instabilidade local.....	32
Figura 6 — Ocorrência de esmagamento do concreto.....	32
Figura 7 — Ocorrência de instabilidade global.....	33
Figura 8 — Exemplo de rede neural.....	54
Figura 9 — Curvas dos modelos constitutivos para o aço elástico perfeitamente plástico (a), bilinear com encruamento isotrópico (b) e trilinear com encruamento isotrópico (c).	61
Figura 10 — Condições de contorno para a análise linear (step Buckle).	63
Figura 11 — Condições de contorno para a análise não linear.....	63
Figura 12 — Modos de flambagem.....	64
Figura 13 — Modos de flambagem local (a) e global (b).	64
Figura 14 — Regiões de tensões residuais de tração (vermelho) e compressão (azul).	65
Figura 15 — Discretização da seção transversal nos testes de malha.....	66
Figura 16 — Testes iniciais de malha.....	66
Figura 17 — Comparação de deformações (em mm) dos modelos JOB-28 (a), JOB-36 (b) e experimento (c).....	68
Figura 18 — Comparação de tensões (em MPa) dos modelos JOB-28 (a), JOB-36 (b) e experimento (c).	68
Figura 19 — Curvas Carga vs. Deslocamento do modelo experimental (CB40-SL3-B) e dos modelos numéricos (JOB-18 e JOB-36).	69
Figura 20 — Deformação (em mm) do JOB-2 (a) e o experimento (b).	71
Figura 21 — Tensões (em MPa) do JOB-2 (a) e o experimento (b).	71
Figura 22 — Curvas Carga vs. Deslocamento do modelo experimental (G400F40-15).	72
Figura 23 — Comparação entre NRk/Nu sob diferentes previsões normativas.....	78
Figura 24 — Comparação entre $NRk/Nu \times \lambda$ sob diferentes previsões normativas.	80

Figura 25 — Comparação entre $NRk/Nu \times \lambda_0, m$ sob diferentes previsões normativas.	82
Figura 26 — Comparação entre $NRk/Nu \times fck$ sob diferentes previsões normativas.	83
Figura 27 — Comparação entre $NRk/Nu \times fy$ sob diferentes previsões normativas.	84
Figura 28 — Comparação entre $NRk/Nu \times \delta$ sob diferentes previsões normativas.	86
Figura 29 — Comparação $Nu \times NNum$	90
Figura 30 — Frequência $\times NNum/Nu$	90
Figura 31 — Comparação entre $NNum/Nu \times \lambda$	91
Figura 32 — Comparação entre $NNum/Nu \times fck$	92
Figura 33 — Comparação entre $NNum/Nu \times fy$	92
Figura 34 — Comparação entre $NNum/Nu \times \delta$	92
Figura 35 — Matriz para geração dos vetores de características das amostras.	94
Figura 36 — Comparação entre $NRk \times NNum$ por normativa.	96
Figura 37 — Comparação entre $NRk/NNum \times \lambda$ por normativa.....	98
Figura 38 — Comparação entre $NRk/NNum \times fck$ sob diferentes previsões normativas.....	100
Figura 39 — Comparação entre $NRk/NNum \times fy$ sob diferentes previsões normativas.	101
Figura 40 — Comparação entre $NRk/NNum \times \delta$ por normativa.....	102
Figura 41 — Resultados dos conjuntos treino e teste para arquitetura [1].	105
Figura 42 — Resultados dos conjuntos treino e teste para arquitetura [5].	105
Figura 43 — Resultados dos conjuntos treino e teste para arquitetura [5 x 5].	106
Figura 44 — Resultados dos conjuntos treino e teste para arquitetura [5 x 5 x 5]. .	106
Figura 45 — Relações AIC/BIC x Desvio Padrão (ponto ótimo em destaque).	107
Figura 46 — Relações Desvio Padrão $\times R^2$	107

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 — Classificação de seções tubulares retangulares preenchidas com concreto sujeitos a compressão axial conforme a NBR 8800 (versão 2008 e 2024).	35
Quadro 2 — Dimensionamento de seções tubulares retangulares preenchidas com concreto conforme a NBR 8800 (versões 2008 e 2024).	37
Quadro 3 — Classificação de seções tubulares retangulares preenchidas com concreto sujeitas a compressão axial conforme a AISC 360.	39
Quadro 4 — Dimensionamento de seções tubulares retangulares preenchidas com concreto conforme o AISC 360.	40
Quadro 5 — Classificação de seções tubulares retangulares preenchidas com concreto sujeitos a compressão axial conforme a EN 1994-1-1.	41
Quadro 6 — Dimensionamento de seções tubulares retangulares preenchidas com concreto conforme a EN 1994-1-1.	42
Quadro 7 — Curva de flambagem com base na norma EN 1994-1-1.	43
Quadro 8 — Imperfeição equivalente.	43
Quadro 9 — Classificação de seções tubulares retangulares preenchidas com concreto sujeitas a compressão axial conforme a AS 5100.6 e AS/NZS 2327.	44
Quadro 10 — Dimensionamento de seções tubulares retangulares preenchidas com concreto conforme a AS 5100.6 e AS/NZS 2327.	45
Quadro 11 — Fatores de imperfeição global e local em relação a constante de seção (αb) AS 5100.6.	46
Quadro 12 — Constante de seção (αb).	47
Quadro 13 — Classificação de seções tubulares retangulares preenchidas com concreto sujeitos a compressão axial conforme a CSA S16.	48
Quadro 14 — Dimensionamento de seções tubulares retangulares preenchidas com concreto conforme a CSA S16.	49
Quadro 15 — Classificação de seção dos experimentos selecionados.	57
Quadro 16 — Parâmetros adotados para calibração da RNA.	74
Quadro 17 — Resumo dos parâmetros estatísticos para NRk/Nu .	78
Quadro 18 — Síntese comparativa do desempenho dos modelos normativos.	88
Quadro 19 — Resumo dos parâmetros estatísticos do modelo numérico.	90
Quadro 20 — Parâmetros geométricos e de materiais adotados.	94
Quadro 21 — Definição dos níveis de espessura (t).	94

Quadro 22 — Resumo dos parâmetros estatísticos para $NRk/NNum$	96
Quadro 23 — Resumo de parâmetros estatísticos de exemplos de teste sob diferentes arquiteturas da Bateria 1.	104

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	American Concrete Institute
AISC	American Institute of Steel Construction
ANSI	American National Standards Institute
AS	Australian Standard
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CDP	Concrete Damaged Plasticity
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CV	Coefficiente de Variação
CSA	Canadian Standards Association
ECS	European Committee for Standardization
EN	European Norm (Norma Europeia / Eurocode)
FAPESP	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo
FEIS	Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira
HSS	High-Strength Steel (Aço de Alta Resistência)
IQR	Intervalo Interquartil
MEF	Método dos Elementos Finitos
MLE	Método da Largura Efetiva
MRD	Método da Resistência Direta
NBR	Norma Brasileira
NZS	New Zealand Standard
ReLU	Rectified Linear Unit (Unidade Linear Retificada)
RNA	Redes Neurais Artificiais
UHPC	Ultra-High Performance Concrete (Concreto de Ultra-Alta Performance)
UNESP	Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"

LISTA DE SIMBOLOS

A_c	Área da seção transversal do concreto
A	Área da seção transversal do perfil de aço
A_g	Área bruta total da seção mista ($A_c + A_y$)
B	Largura da base da seção retangular
H	Altura da seção retangular
B_i/H_i	Esbeltez local
I_c	Momento de inércia da seção de concreto
I_y	Momento de inércia da seção de aço
L	Comprimento do pilar
r	Raio de giração homogêneo da seção mista
t	Espessura da parede do tubo de aço
E_c	Módulo de elasticidade do concreto
E	Módulo de elasticidade do aço
$(EI)_e$	Rigidez à flexão efetiva da seção mista
f_c	Resistência à compressão do concreto
f_y	Resistência ao escoamento do aço
f_u	Resistência última do aço (tração)
δ	Taxa mecânica do aço (fator de contribuição do aço na resistência)
λ	Índice de esbeltez local da chapa de aço (b/t)
λ_G	Índice de esbeltez global do pilar (KL/r)
$\lambda_{0,m}$	Índice de esbeltez relativo
λ_p	Limite de esbeltez para seção compacta
λ_r	Limite de esbeltez para seção semcompacta
χ	Fator de redução de resistência associado à flambagem global
α	Fator de imperfeição (curvas de flambagem a, b, c, d - Eurocode)
α_b	Constante de seção (parâmetro de imperfeição da AS 5100.6)
α_c	Fator de contribuição do concreto na rigidez (NBR 8800:2024)
N_e	Carga crítica de flambagem elástica (Euler)
N_{Rk}	Força axial resistente característica da seção transversal

N_u	Resistência última experimental (carga de falha obtida em ensaio)
N_{Num}	Capacidade resistente predita pelo modelo numérico
σ_{rc}	Tensão residual de compressão no aço
σ_{rt}	Tensão residual de tração no aço
ψ	Ângulo de dilatação (Dilation angle - Parâmetro CDP)
ϵ	Excentricidade (Eccentricity - Parâmetro CDP)
f_{b0}/f_c	Relação de resistência biaxial/uniaxial à compressão (CDP)
K_c	Fator de forma da superfície de escoamento (CDP)
μ	Parâmetro de viscosidade (Viscosity - Regularização numérica)
R^2	Coefficiente de determinação (Acurácia do modelo)
AIC	Akaike Information Criterion (Critério de qualidade do modelo RNA)
BIC	Bayesian Information Criterion (Critério de qualidade do modelo RNA)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	PILARES MISTOS DE AÇO E CONCRETO.....	19
1.2	SEÇÕES RETANGULARES NÃO COMPACTAS.....	20
1.3	LACUNA CIENTÍFICA.....	21
1.4	OBJETIVO.....	22
1.4.1	Geral	22
1.4.2	Específicos	22
1.5	JUSTIFICATIVA	23
1.6	METODOLOGIA.....	24
1.7	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	26
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	28
2.1	INTERAÇÃO AÇO E CONCRETO: CONFINAMENTO E IMPERFEIÇÕES INICIAIS	29
2.2	MODOS DE FALHA.....	31
2.3	MODELO ANALÍTICO	33
2.3.1	NBR 8800 (2008/2024).....	34
2.3.1.1	Classificação	34
2.3.1.2	Crterios de dimensionamento e método de cálculo	35
2.3.1.3	Consideração de Imperfeições e fator de redução	37
2.3.2	AISC 360 (2022)	38
2.3.2.1	Classificação	38
2.3.2.2	Crterios de dimensionamento e método de cálculo	39

2.3.2.3	Consideração de Imperfeições e fator de redução	40
2.3.3	EN 1994-1-1 (2004)	40
2.3.3.1	Classificação	41
2.3.3.2	Critérios de dimensionamento e método de cálculo	41
2.3.3.3	Consideração de Imperfeições e fator de redução	42
2.3.4	AS 5100.6 / NZS 2327 (2017)	43
2.3.4.1	Classificação	44
2.3.4.2	Critérios de dimensionamento e método de cálculo	44
2.3.4.3	Consideração de Imperfeições e fator de redução	45
2.3.5	CSA S16 (2015)	47
2.3.5.1	Classificação	47
2.3.5.2	Critérios de dimensionamento e método de cálculo	48
2.3.5.3	Fator de redução	49
2.4	MODELO NUMÉRICO	49
2.4.1	Modelos constitutivos para aço e concreto	50
2.4.2	Imperfeições geométricas	51
2.4.3	Tensões Residuais	51
2.4.4	Calibração e Validação	52
2.5	MODELO DE APRENDIZAGEM DE MÁQUINA.....	52
2.5.1	Rede Neural Artificial (RNA)	53
2.5.2	Processo de Aprendizagem	54
3	MODELAGEM NUMÉRICA	56
3.1	ESTRATÉGIA DE MODELAGEM E VALIDAÇÃO	56

3.2	REFERÊNCIA PARA A VALIDAÇÃO.....	56
3.3	MODELOS CONSTITUTIVOS.....	57
3.3.1	Carreira e Chu.....	58
3.3.2	Modelo de Falha (Concrete Damaged Plasticity – CDP).....	59
3.3.3	Aço.....	61
3.4	CONDIÇÕES DE CONTORNO E INTERAÇÕES AÇO-CONCRETO.....	62
3.5	TENSÕES RESIDUAIS E IMPERFEIÇÕES GEOMÉTRICAS.....	63
3.6	DISCRETIZAÇÃO E ESTUDO DE CONVERGÊNCIA DE MALHA.....	65
3.7	CALIBRAÇÃO.....	67
3.7.1	Khan et al., 2017.....	67
3.7.1	Lee et al., 2012.....	70
4	MODELAGEM DE REDE NEURAL.....	73
5	VALIDAÇÃO E AVALIAÇÃO DOS MODELOS PREDITIVOS.....	75
5.1	MODELO ANALÍTICO.....	76
5.1.1	Coefficiente de determinação.....	77
5.1.2	Influência da Esbeltez (Local e Global).....	79
5.1.3	Influência das Resistências dos Materiais.....	83
5.1.4	Influência da Taxa Mecânica do Aço.....	85
5.1.5	Conclusões quanto ao método analítico.....	87
5.2	MODELO NUMÉRICO.....	88
5.2.1	Coefficiente de determinação.....	89

5.2.2	Influência da Esbeltez (Local)	90
5.2.3	Influência das Resistências dos Materiais	91
5.2.4	Influência da Taxa Mecânica do Aço	92
5.2.5	Conclusões quanto ao método numérico	93
5.3	ANÁLISE PARAMÉTRICA	93
5.3.1	Coeficiente de determinação	95
5.3.2	Influência da Esbeltez (Local)	98
5.3.3	Influência das Resistências dos Materiais	99
5.3.4	Influência da Taxa Mecânica do Aço	101
5.3.5	Conclusões quanto aos resultados da parametrização	103
5.4	MODELO DE APRENDIZAGEM DE MÁQUINA.....	103
6	CONCLUSÃO.....	109
	REFERÊNCIAS.....	111
	APÊNDICE A – AMOSTRA 180 PILARES FILTRADOS DE THAI (2020)	117
	APÊNDICE B – RESULTADOS DA VALIDAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO	122
	APÊNDICE C – RESULTADOS PARAMETRIZAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO	126
	APÊNDICE D – RESULTADOS PARAMETRIZAÇÃO DE ARQUITETURA DA REDE NEURAL	127

1 INTRODUÇÃO

O uso de estruturas mistas de aço e concreto na construção civil é impulsionado pelas vantagens de eficiência e otimização estrutural obtidas ao combinar materiais com propriedades distintas, porém complementares. A alta resistência à tração e a ductilidade do aço, aliadas à elevada resistência à compressão e à rigidez do concreto, permitem projetar elementos estruturais mais eficientes, capazes de vencer maiores vãos e suportar cargas elevadas mesmo com seções transversais mais esbeltas.

Além dos benefícios técnicos e econômicos, o sistema misto oferece vantagens do ponto de vista da sustentabilidade, uma vez que o uso mais eficiente dos recursos reduz o consumo de materiais e minimiza o desperdício. A pré-fabricação de componentes metálicos e a simplificação dos processos de montagem permitem, adicionalmente, acelerar significativamente o cronograma de obras, reduzindo os custos associados.

Aplicações pioneiras, como na Ponte Rock Rapids e no Edifício *Methodist Building*, ambos construídos em 1894 nos Estados Unidos, marcaram o início do emprego de estruturas mistas por meio de vigas metálicas em conjunto com o concreto (Griffis, 1992). No Brasil, Verissimo (2007) destaca que a adoção das estruturas mistas cresceu a partir da década de 1960, impulsionada pelo desenvolvimento de novas tecnologias construtivas e pela adaptação de normas internacionais, consolidando-se nas atuais normas NBR 8800 (ABNT, 2024).

1.1 PILARES MISTOS DE AÇO E CONCRETO

Dentro do sistema das estruturas mistas, a ABNT NBR 8800:2024 define três tipologias para os pilares, classificadas conforme a geometria e a organização dos elementos na seção transversal, refletindo diretamente na forma de interação entre eles: pilares totalmente revestidos, parcialmente revestidos e tubulares preenchidos, conforme ilustrado na Figura 1.

Na configuração totalmente revestida, o perfil de aço, geralmente do tipo I, H ou W, é completamente envolto por concreto e tem como obrigatório o uso de armaduras longitudinais e transversais para o controle da fissuração. Os pilares parcialmente revestidos caracterizam-se pelo preenchimento com concreto das almas do perfil de aço, mantendo as mesas expostas. Semelhante à configuração totalmente

REFERENCIAS

ABATHUN, Mehari Zelalem; HAN, Jingtao; YU, Wang. Effects of manufacturing methods and production routes on residual stresses of rectangular and square hollow steel sections: a review. **Archives of Civil and Mechanical Engineering**, v. 21, n. 3, p. 100, 8 jun. 2021.

AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. **ANSI/AISC 360-22: Specification for Structural Steel Buildings**. USA: ANSI, 2022.

ASLANI, Farhad *et al.* Behaviour and design of composite columns incorporating compact high-strength steel plates. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 107, p. 94–110, abr. 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8800: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edificações**. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8800: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edificações**. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

AUSTRALIAN STANDARD. **AS 5100.6: Steel and composite construction**. Australia: AS, 2017.

AYOUGH, Pouria *et al.* The effects of cross-sectional shapes on the axial performance of concrete-filled steel tube columns. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 176, p. 106424, jan. 2021.

CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION. **CSA S16: Design of steel structures**. Canada: CSA, 2015.

CARREIRA, Domingo J.; CHU, Kuang-Han. Stress-Strain Relationship for Plain Concrete in Compression. **ACI Journal Proceedings**, v. 82, n. 6, 1985.

CARREIRA, Domingo J.; CHU, Kuang-Han. Stress-strain relationship for reinforced concrete in tension. *In*: JOURNAL PROCEEDINGS. **Anais...** 1986.

CARVALHO, Adriano Silva de *et al.* Machine Learning-Based Design Approach for Concrete-Filled Stainless Steel Tubular Columns. **Arabian Journal for Science and Engineering**, v. 48, n. 10, p. 14105–14118, out. 2023.

CHEN, Ju; JIN, Wei-liang. Experimental investigation of thin-walled complex section concrete-filled steel stub columns. **Thin-walled structures**, v. 48, n. 9, p. 718–724, 2010.

CHEN, Junbo; CHAN, Tak-Ming; CHUNG, Kwok-Fai. Design of square and rectangular CFST cross-sectional capacities in compression. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 176, p. 106419, jan. 2021.

DAI, X. H. *et al.* Numerical analysis of slender elliptical concrete filled columns under axial compression. **Thin-Walled Structures**, v. 77, p. 26–35, abr. 2014.

DEGÉE, Hervé; DETZEL, Annette; KUHLMANN, Ulrike. Interaction of global and local buckling in welded RHS compression members. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 64, n. 7–8, p. 755–765, jul. 2008.

DING, Fa-xing *et al.* Mechanical performance of stirrup-confined concrete-filled steel tubular stub columns under axial loading. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 98, p. 146–157, 2014.

DUNDU, M. Compressive strength of circular concrete filled steel tube columns. **Thin-Walled Structures**, v. 56, p. 62–70, jul. 2012.

DUNDU, M. Column buckling tests of hot-rolled concrete filled square hollow sections of mild to high strength steel. **Engineering Structures**, v. 127, p. 73–85, 2016.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 1994-1-1: Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings**. Europe: ECS, 2004.

FARIDMEHR, Iman; NEHDI, Moncef L.; FAROKHINEJAD, Ali; SAHRAEI, Mohammad Ali; KAMYAB, Hesam; ALEKSANDR VALERIEVICH, Kiyanets. An innovative multi-objective optimization approach for compact concrete-filled steel tubular (CFST) column design utilizing lightweight high-strength concrete. **International Journal of Lightweight Materials and Manufacture**, v. 7, n. 3, p. 405–425, maio 2024.

FU, Guangyuan *et al.* Behaviour of rectangular concrete-filled steel tubular slender column with unequal wall thickness. **Engineering Structures**, v. 236, p. 112100, jun. 2021.

FURLONG, Richard W. Strength of Steel-Encased Concrete Beam Columns. **Journal of the Structural Division**, v. 93, n. 5, p. 113–124, out. 1967.

GRIFFIS, Lawrence G. Composite frame construction. **Constructional steel design: an international guide**, p. 523–553, 1992.

GUO, L. *et al.* Analytical and experimental research on axially loaded slender HSC filled RHS steel tubular columns. **Ind Constr China**, v. 35, n. 3, p. 75–79, 2005.

GUO, L. Theoretical and experimental research on the behavior of concrete-filled rectangular hollow section steel tubes. **Harbin Institute of Technology: Harbin, China**, 2006.

HAN, Lin-Hai; HOU, Chao; HUA, You-Xing. Concrete-filled steel tubes subjected to axial compression: Life-cycle based performance. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 170, p. 106063, jul. 2020.

HAN, Lin-Hai; LI, Wei; BJORHOVDE, Reidar. Developments and advanced applications of concrete-filled steel tubular (CFST) structures: Members. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 100, p. 211–228, set. 2014.

HAN, Lin-Hai; YAO, Guo-Huang. Influence of concrete compaction on the strength of concrete-filled steel RHS columns. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 59, n. 6, p. 751–767, 2003.

HAN, Lin-Hai; YAO, Guo-Huang. Experimental behaviour of thin-walled hollow structural steel (HSS) columns filled with self-consolidating concrete (SCC). **Thin-Walled Structures**, v. 42, n. 9, p. 1357–1377, 2004.

HAN, Lin-Hai; YAO, Guo-Huang; ZHAO, Xiao-Ling. Tests and calculations for hollow structural steel (HSS) stub columns filled with self-consolidating concrete (SCC). **Journal of Constructional Steel Research**, v. 61, n. 9, p. 1241–1269, 2005.

HASSANEIN, M. F.; PATEL, V. I. Round-ended rectangular concrete-filled steel tubular short columns: FE investigation under axial compression. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 140, p. 222–236, jan. 2018.

HUANG, Zhichao *et al.* Local and post-local buckling of fabricated high-strength steel and composite columns. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 154, p. 235–249, mar. 2019.

HUANG, Zhichao *et al.* Behaviour and design of ultra-high-strength CFST members subjected to compression and bending. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 175, p. 106351, dez. 2020.

INAI, E.; SAKINO, K. Simulation of flexural behavior of square concrete filled steel tubular columns. *In*: PROC., 3RD JOINT TECHNICAL COORDINATING COMMITTEE MEETING, US-JAPAN COOPERATIVE RESEARCH PROGRAM, PHASE 5: COMPOSITE AND HYBRID STRUCTURES. **Anais...** National Science Foundation Arlington, Va, 1996.

JAGOTA, Vishal; SETHI, Aman Preet Singh; KUMAR, Khushmeet. Finite Element Method: An Overview. **Walailak Journal of Science and Technology (WJST)**, v. 10, n. 1, p. 1–8, jan. 2013.

KHAN, M. *et al.* Concentrically loaded slender square hollow and composite columns incorporating high strength properties. **Engineering Structures**, v. 131, p. 69–89, jan. 2017.

LAI, Zhichao; VARMA, Amit H.; ZHANG, Kai. Noncompact and slender rectangular CFT members: Experimental database, analysis, and design. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 101, p. 455–468, out. 2014.

LEE, Seong-Hui *et al.* Structural performance of welded built-up square CFST stub columns. **Thin-Walled Structures**, v. 52, p. 12–20, mar. 2012.

LIN, CY. Axial capacity of concrete infilled cold-formed steel columns. 1988.

LIU, Dalin. Tests on high-strength rectangular concrete-filled steel hollow section stub columns. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 61, n. 7, p. 902–911, 2005.

LIU, Dalin; GHO, Wie-Min; YUAN, Jie. Ultimate capacity of high-strength rectangular concrete-filled steel hollow section stub columns. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 59, n. 12, p. 1499–1515, 1 dez. 2003.

LUO, L. Experimental research on long filled concrete square steel tube columns under axial compressive load. 1986.

MEMARZADEH, Armin; SABETIFAR, Hassan; NEMATZADEH, Mahdi. A comprehensive and reliable investigation of axial capacity of Sy-CFST columns using machine learning-based models. **Engineering Structures**, v. 284, p. 115956, jun. 2023.

MURSI, Mohanad; UY, Brian. Strength of slender concrete filled high strength steel box columns. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 60, n. 12, p. 1825–1848, 2004.

NAKAHARA, H.; SAKINO, K. Axial compressive and uniform bending tests of high strength concrete filled square steel tubular columns. *In*: PROC., 5TH PACIFIC STRUCTURAL STEEL CONF. **Anais...** 1998.

NASER, M. Z.; THAI, Son; THAI, Huu-Tai. Evaluating structural response of concrete-filled steel tubular columns through machine learning. **Journal of Building Engineering**, v. 34, p. 101888, fev. 2021.

NEW ZEALAND STANDARD. **NZS 2327: Composite structures – Composite steel-concrete construction in buildings**. New Zealand: NZS, 2017.

NGUYEN, Tan-Trac *et al.* Behaviour and design of high strength CFST columns with slender sections. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 182, p. 106645, jul. 2021.

OLIVEIRA, Vinicius Moura de *et al.* Data-driven design approach for the lateral-distortional buckling in steel-concrete composite cellular beams using machine learning models. **Structures**, v. 61, p. 106018, mar. 2024.

PAPANIKOLAOU, Vassilis K.; KAPPOS, Andreas J. Confinement-sensitive plasticity constitutive model for concrete in triaxial compression. **International Journal of Solids and Structures**, v. 44, n. 21, p. 7021–7048, out. 2007.

ROSSATO, Leonardo *et al.* Calibração de modelo numérico para colunas mistas de aço preenchidas de concreto de alta resistência. *In*: X INOVACIVIL. **Anais...** 2023. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/372676617_Calibracao_de_modelo_numerico_para_colunas_mistas_de_aco_preenchidas_de_concreto_de_alta_resistencia>. Acesso em: 22 ago. 2025

SAKINO, Kenji *et al.* Behavior of centrally loaded concrete-filled steel-tube short columns. **Journal of structural engineering**, v. 130, n. 2, p. 180–188, 2004.

SCHNEIDER, Stephen P. Axially loaded concrete-filled steel tubes. **Journal of structural Engineering**, v. 124, n. 10, p. 1125–1138, 1998.

SHERMAN, Donald R. Residual Stresses and Tubular Compression Members. **Journal of the Structural Division**, v. 97, p. 891–904, 1971.

TAO, Zhong *et al.* Analysis and design of concrete-filled stiffened thin-walled steel tubular columns under axial compression. **Thin-Walled Structures**, v. 47, n. 12, p. 1544–1556, 2009.

TAO, Zhong; HAN, Lin-Hai; WANG, Dong-Ye. Experimental behaviour of concrete-filled stiffened thin-walled steel tubular columns. **Thin-Walled Structures**, v. 45, n. 5, p. 517–527, 2007.

TAO, Zhong; HAN, Lin-Hai; WANG, Zhi-Bin. Experimental behaviour of stiffened concrete-filled thin-walled hollow steel structural (HSS) stub columns. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 61, n. 7, p. 962–983, 2005.

TAO, Zhong; WANG, Zhi-Bin; YU, Qing. Finite element modelling of concrete-filled steel stub columns under axial compression. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 89, p. 121–131, out. 2013.

THAI, Huu-Tai. **Concrete-filled steel tubular (CFST) columns database with 3,208 tests**. Mendeley, 2020. Disponível em: <<https://data.mendeley.com/datasets/j3f5cx9yjh/1>>. Acesso em: 3 fev. 2025

THAI, Huu-Tai *et al.* Reliability considerations of modern design codes for CFST columns. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 177, p. 106482, fev. 2021.

THAI, Son; CUONG, Ngo-Huu; THUAT, Dinh Van. Finite element modelling of rectangular concrete-filled steel tube stub columns incorporating high strength and ultra-high strength materials under concentric axial compression. **Journal of Science and Technology in Civil Engineering (STCE) - HUCE**, v. 15, n. 4, p. 74–87, 31 out. 2021.

UY, B. Ductility and strength of thin-walled concrete filled box columns. *In*: COMPOSITE CONSTRUCTIVE-CONVENTIONAL AND INNOVATIVE (INNSBRUCK, 16-18 SEPTEMBER 1997). **Anais...** 1997.

UY, Brian. Local and post-local buckling of concrete filled steel welded box columns. **Journal of constructional steel research**, v. 47, n. 1–2, p. 47–72, 1998.

UY, Brian. Strength of concrete filled steel box columns incorporating local buckling. **Journal of structural engineering**, v. 126, n. 3, p. 341–352, 2000.

VARMA, Amit Hariom. **Seismic behavior, analysis, and design of high strength square concrete filled steel tube (CFT) columns**. [S.l.]: Lehigh University, 2001.

VERISSIMO, Gustavode Souza. Desenvolvimento de um conector de cisalhamento em chapa dentada para estruturas mistas de aço e concreto e estudo do seu comportamento. 2007.

WAN, Cheng-Yong; ZHA, Xiao-Xiong. Nonlinear analysis and design of concrete-filled dual steel tubular columns under axial loading. **Steel and Composite Structures**, v. 20, n. 3, p. 571–597, 2016.

YAN, Yanxiang *et al.* Axial behavior of ultra-high performance concrete (UHPC) filled stocky steel tubes with square sections. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 158, p. 417–428, jul. 2019.

YAO, Ye; QUACH, Wai-Meng; YOUNG, Ben. Finite element-based method for residual stresses and plastic strains in cold-formed steel hollow sections. **Engineering Structures**, v. 188, p. 24–42, jun. 2019.

YE, Z. Compressive behavior of high-strength concrete-filled square and rectangular steel tubes. 2001.

YU, Chao-Qun; TONG, Jing-Zhong; TONG, Gen-Shu. Behavior and design of slender concrete-filled wide rectangular steel tubular columns under axial compression. **Structures**, v. 33, p. 3137–3146, out. 2021.

YU, Qing; TAO, Zhong; WU, Ying-Xing. Experimental behaviour of high performance concrete-filled steel tubular columns. **Thin-Walled Structures**, v. 46, n. 4, p. 362–370, 2008.

YU, T. *et al.* Finite element modeling of confined concrete-II: Plastic-damage model. **Engineering Structures**, v. 32, n. 3, p. 680–691, mar. 2010.

YUN, Xiang; GARDNER, Leroy. Stress-strain curves for hot-rolled steels. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 133, p. 36–46, jun. 2017.

ZARRINGOL, Mohammadreza *et al.* Behaviour and design calculations of rectangular CFST beam-columns with slender sections. **Engineering Structures**, v. 222, p. 111142, nov. 2020.

ZHANG, Bohan *et al.* Machine learning methods for compression capacity prediction and sensitivity analysis of concrete-filled steel tubular columns: State-of-the-art review. **Structures**, v. 72, p. 108259, fev. 2025a.

ZHANG, Hanwen *et al.* Enhancing cold-formed steel column prediction with machine learning: Insights and methodologies. **Structures**, v. 79, p. 109393, set. 2025b.

ZHANG, Z. Experimental research on short filled concrete square steel tube columns under axial compressive load. **Harbin University of Technology: Harbin, China**, 1984.

ZHONG, Lei; GUO, Lanhui; JIA, Chen. Axial compression behavior of stub square concrete-filled steel tubes with regional defect. **Engineering Structures**, v. 278, p. 115510, mar. 2023.