

Comportamento experimental de pilares mistos tubulares circulares submetidos a força axial concêntrica

Experimental behaviour of circular concrete-filled steel tube columns under axial concentric load

DOI:10.34117/bjdv7n1-432

Recebimento dos originais: 01/01/2021

Aceitação para publicação: 15/01/2021

Ândrey Teston Santini

Formação acadêmica mais alta: Engenheiro

Instituição de atuação atual: Universidade de Passo Fundo - PPGEng

Endereço completo: Av. Brasil Leste, 285 - São José, Passo Fundo - RS, 99052-900

E-mail.: 121438@upf.br

Fernando Busato Ramires

Formação acadêmica mais alta: Doutor

Instituição de atuação atual: Universidade de Passo Fundo - PPGEng

Endereço completo: Av. Brasil Leste, 285 - São José, Passo Fundo - RS, 99052-900

E-mail.: fernandoramires@upf.br

RESUMO

Estruturas mistas como tubulares preenchidas por concreto, oferecem inúmeros benefícios estruturais, incluindo alta resistência, resistência ao fogo, ductilidade e alta capacidade de absorção de energia. Pilares mistos possuem muitas vantagens em relação aos pilares de aço e pilares de concreto armado devido a sua alta resistência à compressão, porque a ocorrência de instabilidades locais no tubo de aço é atrasada pela restrição provocada pela presença de concreto, de mesmo modo, pela ductilidade do concreto causada pelo efeito de confinamento provocado pela presença do tubo de aço. O comportamento de um pilar misto é alterado conforme ocorre a alteração de parâmetros físicos dos materiais, parâmetros geométricos dos membros e estados de tensão. Apesar de pilares mistos tubulares circulares serem utilizados para resistir a variados esforços como compressão axial, flexão e torção, o maior uso é em forma de compressão axial concêntrica. Este artigo tem objetivo principal analisar uma ampla gama de exemplares experimentais disponíveis na bibliografia para avaliar a influência de parâmetros geométricos e mecânicos no comportamento de pilares mistos tubulares circulares, este estudo reuniu 54 referências totalizando 557 resultados de modelos submetidos a força axial concêntrica. Os parâmetros índice de esbeltez global (L/D), índice de esbeltez local (D/t), resistência do concreto (f_{ck}) e a resistência do aço (f_y) foram analisados para verificar sua influência no desempenho estrutural de pilares mistos tubulares circulares. A novidade deste estudo é analisar uma ampla gama de exemplares experimentais em relação a fatores de influência através de padrões de desempenho existentes. Além da resistência última (N_u), parâmetros de desempenho como: índice de resistência (SI), fator de confinamento (ξ), índice de contribuição do concreto (CCR) e tensão de confinamento (f_1) foram analisados.

Palavras-chave: pilar misto tubular circular, comportamento axial, confinamento, concreto de alto desempenho, aço de alta resistência.

ABSTRACT

Estruturas mistas como tubulares preenchidas por concreto, fornecem inúmeros benefícios, incluindo alta resistência, resistência ao fogo, ductilidade e alta capacidade de absorção de energia. Pilares mistos possuem muitas vantagens em relação aos pilares de aço e pilares de concreto armado devido a sua alta resistência à compressão, porque a ocorrência de instabilidades locais no tubo de aço é atrasada pela restrição provocada pela presença de concreto, de mesmo modo, pela ductilidade do concreto causado pelo efeito de confinamento provocado pela presença do tubo de aço. O comportamento de um pilar misto é alterado conforme ocorre a alteração de parâmetros físicos dos materiais, parâmetros geométricos dos membros e estados de tensão. Apesar de pilares mistos tubulares circulares serem utilizados para resistir a variados esforços como compressão axial, flexão e torção, o maior uso é em forma de compressão axial concêntrica. Este artigo tem objetivo principal analisar uma ampla gama de exemplares experimentais disponíveis na bibliografia para avaliar a parâmetros geométricos e mecânicos no comportamento de pilares mistos tubulares circulares, este estudo reuniu 54 referências totalizando 557 resultados de modelos modelando a força axial concêntrica. Os parâmetros índice de esbeltez global (L/D), índice de esbeltez local (D/t), resistência do concreto (f_{ck}) e a resistência do aço (f_{ck}) foram dados para verificar sua influência no desempenho estrutural de pilares mistos tubulares circulares. A novidade deste estudo é analisar uma ampla gama de exemplos experimentais em relação a fatores de influência de padrões de desempenho existentes. Além da resistência última (N_u), os parâmetros de desempenho como: índice de resistência (SI), fator de confinamento (ξ), índice de contribuição do concreto (CCR) e tensão de confinamento (f_1) foram forme forçado.

Keywords: concrete filled steel tube (*CFST*), composite column, compressive behavior, confinement, high-strength concrete, high-strength steel.

1 INTRODUÇÃO

Estruturas em concreto pré-fabricado [1], estruturas de aço e estruturas de concreto armado são estudadas com objetivo de se obter o melhor desempenho estrutural possível, comparações entre estes sistemas [2] são realizadas para a escolha do melhor sistema possível. Uma maneira de combinar os efeitos positivos destes sistemas, é o uso de estruturas mistas, fruto de avanços na pesquisa de elementos estruturais.

Estruturas tubulares preenchidas por concreto são um tipo de estrutura mista utilizada atualmente na Engenharia Civil e consistem em um tubo de aço externo com um núcleo de concreto dentro dele. O tubo de aço age como uma forma permanente e pode ser constituído por várias seções transversais [3]. Estruturas mistas como tubulares preenchidas por concreto, oferecem inúmeros benefícios estruturais, incluindo alta resistência, resistência ao fogo, ductilidade e alta capacidade de absorção de energia [4].

Pilares mistos possuem muitas vantagens em relação aos pilares de aço e pilares de concreto armado devido a sua alta resistência à compressão, porque a ocorrência de instabilidades locais no tubo de aço é atrasada pela restrição provocada pela presença de

concreto, de mesmo modo, pela ductilidade do concreto causada pelo efeito de confinamento provocado pela presença do tubo de aço [4]. Pilares mistos são utilizados para estruturas resistentes a terremotos, pilares de pontes sujeitos a impactos do tráfego, estruturas de prédios altos e como estacas [5]. Pilares mistos são utilizados amplamente em diversas aplicações, principalmente em grandes edifícios e obras de arte [6]. O uso de pilares mistos na Construção Civil é fruto de avanços na pesquisa de elementos estruturais, impulsionados por edifícios cada vez mais esbeltos, necessidade de maior espaço em menores áreas de planta e facilidade na trabalhabilidade durante a construção [7].

O comportamento de um pilar misto é alterado conforme ocorre a alteração de parâmetros físicos dos materiais, parâmetros geométricos dos membros e estados de tensão [3]. A resposta geral de pilares mistos possui ênfase na resposta não linear, ação composta, efeito da ligação na interface aço-concreto, histórico de carregamento e efeitos de instabilidades [8]. Apesar de pilares mistos tubulares circulares serem utilizados para resistir a variados esforços como compressão axial, flexão e torção, o maior uso é em forma de compressão axial concêntrica [9].

Este artigo tem objetivo principal analisar uma ampla gama de exemplares experimentais disponíveis na bibliografia para avaliar a influência de parâmetros geométricos e mecânicos no comportamento de pilares mistos tubulares circulares, este estudo reuniu 54 referências totalizando 557 resultados de modelos submetidos a força axial concêntrica.

Um problema geral na validação e verificação de diversos estudos analíticos e numéricos acerca de pilares mistos tubulares circulares é de que a gama de experimentos disponíveis na bibliografia não é padrão e unificada devido a cada estudo amplificar informações em relação ao parâmetro de interesse do estudo particular. Este estudo busca resolver este problema especificamente a modelos submetidos a força axial concêntrica.

Fornecer estes dados é fundamental para que pesquisadores possam utilizá-los para a formulação de modelos de cálculo utilizados para amplificar o desempenho destes elementos. Este estudo fornece uma abordagem sobre os principais fatores que influenciam o comportamento destes elementos, tanto em relação a propriedades geométricas, com em relação a propriedades mecânicas. Os parâmetros índice de esbeltez global (L/D), índice de esbeltez local (D/t), resistência do concreto (f_{ck}) e a resistência do aço (f_y) foram analisados para verificar sua influência no desempenho estrutural de pilares mistos tubulares circulares.

A questão de pesquisa deste estudo é conhecer o desempenho de um amplo conjunto de exemplares experimentais, considerando a hipótese de que estes resultados apresentem um padrão característico em relação aos principais fatores que influenciam o comportamento estrutural destes elementos.

A novidade deste estudo é analisar uma ampla gama de exemplares experimentais em relação a fatores de influência através de padrões de desempenho existentes. Além da resistência última (N_u), parâmetros de desempenho como: índice de resistência (SI), fator de confinamento (ξ), índice de contribuição do concreto (CCR) e tensão de confinamento (f_1) foram analisados.

Este estudo inicia abordando modelos normativos para a determinação da resistência última (N_u) de pilares mistos tubulares circulares, segue abordando os principais fatores que influenciam o comportamento de pilares mistos tubulares circulares sob força axial concêntrica e apresenta as propriedades geométricas e mecânicas dos modelos do extenso número de exemplares experimentais que formam a base de dados utilizada neste estudo. Os resultados são demonstrados relacionando os parâmetros de influência sob aspecto dos parâmetros de desempenho, e por fim, são apresentadas conclusões gerais obtidas através deste estudo.

2 MODELOS NORMATIVOS PARA DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA ÚLTIMA DE PILARES MISTOS TUBULARES CIRCULARES.

A Tabela 1 demonstra o roteiro de cálculo para determinação da resistência última de pilares mistos tubulares circulares das normas Americana ACI 318 [10] e AISC 360 [11], Australiana AS/NZ 2327 [12], Europeia EN 4 [13], Chinesa DBJ 13-51-2010 [14], Japonesa AIJ [15] e brasileira ABNT NBR 8800 [16].

Tabela 1: Modelos normativos para determinação da resistência última de pilares mistos tubulares circulares.

Norma	Previsão de força
ACI 318 [10]	$N_u = f_y A_s + 0,85 f'_c A_c$
	$N_u = \left[0,658 \left(\frac{N_0}{N_{cr}} \right) \right] N_0 \rightarrow N_0 \leq 2,25 N_{cr}$
	$N_u = 0,877 N_{cr} \rightarrow N_0 > 2,25 N_{cr}$
	$N_0 = f_y A_s + 0,85 f'_c A_c$
AISC 360 [11]	$N_{cr} = \frac{\pi^2}{(KL)^2} (EI_{eff})$
	$(EI)_{eff} = E_s I_s + C_3 E_c I_c$
	$C_3 = 0,45 + 3 \frac{A_s}{A_s + A_c} \leq 0,9$

AS/NZS2327 [12]

$$N_u = \eta_s f_y A_s + f'_c A_c \left(1 + \eta_c \frac{t f_y}{D f'_c} \right)$$

$$\eta_s = 0.25(3 + 2\lambda) \leq 1$$

$$\eta_c = 4.9 - 18.5\lambda + 17\lambda^2 \geq 0$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{N_{plR}}{N_{cr}}}$$

$$N_{plR} = f_y A_s + f_c A_c$$

$$N_{cr} = \frac{\pi^2}{(KL)^2} (EI_{eff})$$

$$(EI)_{eff} = E_s I_s + E_c I_c$$

EN 4 [13]

$$N_u = \eta_s f_y A_s + f'_c A_c \left(1 + \eta_c \frac{t f_y}{D f'_c} \right)$$

$$\eta_s = \eta_{s0} + (1 - \eta_{s0}) \frac{10e}{D}$$

$$\eta_c = \eta_{c0} \left(1 - \frac{10e}{D} \right)$$

$$\eta_{s0} = 0.25(3 + 2\lambda) \leq 1$$

$$\eta_{c0} = 4.9 - 18.5\lambda + 17\lambda^2 \geq 0$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{N_{plR}}{N_{cr}}}$$

$$N_{plR} = f_y A_s + f_c A_c$$

$$N_{cr} = \frac{\pi^2}{(KL)^2} (EI_{eff})$$

$$(EI)_{eff} = E_s I_s + 0.6 E_c I_c$$

DBJ 13-51-2010 [14]

$$N_u = f_{sc} (A_s + A_c)$$

$$f_{sc} = f_{ck} (1,14 + 1,02\xi)$$

$$\xi = \frac{f_y A_s}{f_{ck} A_c}$$

AIJ [15]

$$N_{u1} = N_{cu,c} + (1 + \eta) N_{cu,s} \rightarrow l/D \leq 4$$

$$N_{u2} = N_{u1} - 0.125 [N_{u1} - N_{u3} (l/D = 12)] (l/D - 4) \rightarrow 4 < l/D \leq 12$$

$$N_{u3} = N_{cr,c} + N_{cr,s} \rightarrow l/D > 12$$

$$N_{cu,c} = 0.85 A_c f_c$$

$$N_{cr,c} = A_c \sigma_{cr}$$

$$\sigma_{cr} = \frac{2}{1 + \sqrt{\lambda_1^4 + 1}} 0.85 f_c \rightarrow \lambda_1 \leq 1$$

$$\sigma_{cr} = 0.83 \exp[C_c (1 - \lambda_1)] 0.85 f_c \rightarrow \lambda_1 > 1$$

$$\lambda_1 = \frac{\lambda}{\pi} \sqrt{\varepsilon_{u,c}}$$

$$\varepsilon_{u,c} = 0.93 (0.85 f_c)^{1/4} \times 10^{-3}$$

$$C_c = 0.568 + 0.00612 f_c$$

$$N_{cu,s} = A_s f_y$$

$$N_{cr,s} = \begin{cases} A_s f_y & \lambda_1 < 0.3 \\ 1 - 0.545(\lambda_1 - 0.3) & 0.3 \leq \lambda_1 < 1.3 \\ N_{E,s}/1.3 & \lambda_1 \geq 1.3 \end{cases}$$

$$\lambda_1 = \frac{\lambda}{\pi} \sqrt{\frac{f_y}{E_s}}$$

$$N_{E,s} = \frac{\pi^2 E_s I_s}{l^2}$$

$$\eta = 0.27$$

ABNT NBR 8800 [16]

$$N_u = f_y A_s + 0,95 f'_c A_c$$

A Tabela 2 demonstra os limites de resistência dos materiais das normas Americana ACI 318 [10] e AISC 360 [11], Australiana AS/NZ 2327 [12], Europeia EN 4 [13], Chinesa DBJ 13-51-2010 [14], Japonesa AIJ [15] e brasileira ABNT NBR 8800 [16].

Tabela 2: Limites na resistência dos materiais (MP_a) de normas de dimensionamento.

Norma	Esbeltez local	Esbeltez global	$f_y (MP_a)$	$f_c (MP_a)$
ACI 318 [10]	$D/t \leq \sqrt{8E_s f_y}$		-	$f_c \geq 17.2$
ANSI/AISC 360 [11]	$D/t \leq 0.15E_s f_y$	$K \cdot \frac{L}{r_t} < 200$	$f_y \leq 525$	$21 \leq f_c \leq 69$
AS/NZS 2327 [12]	$\frac{D}{t} \frac{250}{f_y} \leq 0.19 \frac{E_s}{f_y}$		$f_y \leq 690$	$20 \leq f_c \leq 100$
EN 4 [13]	$D/t \leq 90 \times \frac{235}{f_y}$	$\lambda \leq 2$	$235 \leq f_y \leq 460$	$20 \leq f_c \leq 50$
DBJ 13-51-2010 [14]	$D/t \leq 150 \times \frac{235}{f_y}$		$235 \leq f_y \leq 420$	$24 \leq f_c \leq 70$
AIJ [15]	$D/t \leq 1.5 \times \frac{23500}{f_y}$	$L/D \leq 12$	$235 \leq f_y \leq 440$	$18 \leq f_c \leq 90$
ABNT NBR 8800 [16]	$D/t \leq 0.15E_s f_y$	$\lambda_0 \leq 2$	$250 \leq f_y \leq 450$	$20 \leq f_c \leq 50$

3 FATORES QUE INFLUENCIAM O COMPORTAMENTO DE PILARES MISTOS TUBULARES CIRCULARES

Os fatores que influenciam o comportamento de pilares mistos tubulares circulares vêm sendo estudados principalmente em relação a fatores como: formato da seção transversal, forma de introdução de carga, índice de esbeltez global (L/D), índice de esbeltez local (D/t), resistência do concreto (f_{ck}), resistência do aço (f_y), presença de reforços transversais e longitudinais, excentricidade da força aplicada, pré carregamentos e falhas entre a seção de concreto e o tubo de aço. Este estudo avalia os principais fatores que influenciam o comportamento de pilares mistos tubulares circulares: índice de esbeltez global (L/D), índice de esbeltez local (D/t), resistência do concreto (f_{ck}) e a resistência do aço (f_y)

Quanto ao índice de esbeltez global (L/D), Kuranovas et al. [3] e Kang et al. [17] classificam um pilar misto como curto, quando a relação $L/D \leq 4$, e como esbelto quando a relação é superior a $L/D > 4$. Onde L é o comprimento efetivo do pilar misto e D é o diâmetro externo do tubo de aço. No entanto, Tao et al. [18] classifica pilares mistos como curtos com relação $2 \leq L/D \leq 5$, assim, desconsiderando efeitos de imperfeições globais. Em adição, normas de dimensionamento para pilares mistos com seções esbeltas podem

ser tratados diferentemente de seções compactas, ao qual, a resistência é normalmente avaliada com base no comportamento plástico [19].

Quanto ao uso de materiais de alta e ultra resistência, em termos de classificação para a tensão de escoamento do aço (f_y), Uy [20] cita que o termo alta resistência é designado em alguns trabalhos técnicos para aços entre 450 MPa a 500 MPa, mas, comumente, se designa a aços estruturais com resistência entre 600 MPa a 700 MPa, considerando o intervalo inferior e intervalo superior como normal e ultra resistência. Em termos de classificação para a resistência característica à compressão do concreto (f_{ck}), Liew e Xiong [21] classificam como concreto de resistência normal: $< 60 MP_a$; alta resistência: $60 MP_a \leq f_{ck} \leq 120 MP_a$ e ultra resistência: $> 120 MP_a$. Medidos através de amostra cilíndrica.

4 ESTUDOS EXPERIMENTAIS ANALISADOS

Há um extenso número de estudos experimentais investigando o comportamento de pilares mistos tubulares circulares sob a força axial concêntrica, neste estudo, são incluídas 54 referências totalizando 557 exemplares de pilares mistos tubulares circulares sob força axial concêntrica, demonstrados na Tabela 3.

Tabela 3: Modelos analisados sob força axial concêntrica.

Autor	n°	L (mm)	D (mm)	t (mm)	Fy (MPa)	Fu (MPa)	Fc (MPa)
Gardener and Jacobson (1967) [22]	7	152-306	76-153	1.70-4.10	363-605		21-34
Knowles and Park (1969) [23]	1	1118-1422	83	1.40-5.84	406-490		42
Gardener (1968) [24]	1	305	168-169	2.60-3.60	288-338		27.0-37.1
Tomii e Yoshimaro (1977) [25]	1	456	152	2.00-3.00	338-290		24.1-28.9
Sakino and Hayashi (1991) [26]	12	348-358	174-179	3.00-9.00	248-283		22-46
Prion e Boheme (1994) [27]	6	500-900	152	1.70	270		73-85
Kato (1995) [28]	12	891-904.5	297-302	4.50-11.90	347.9-471.4		26.6-79.1
Schneider (1998) [29]	3	605-616	141	3.00 - 6.68	285-537		23.80-28.18
Saisho et al. (1999) [30]	29	305-419	102-140	2.37-3.00	341-462.6		24.4-130.2
Kilpatrick e Rangan (1999) [31]	1	350	102	2.40	410	475	106
Campione et al. (2000) [32]	4	1000	127	3.50	206	324	25
Campione et al. (2002) [33]	4	200-1500	127	3.00	474	528	24
O'shea e Bridge (2000) [34]	15	562.5-664.5	165-190	0.86-2.82	185.7-363.3		38.2-108
Mei et al. (2001) [35]	9	203	102	0.40-3.10	448	552	71
Huang et al. (2002) [36]	3	600-900	200-300	2.00-5.00	265.8-341.7		27.15-31.15
Johansson e Gylltoft (2002) [37]	1	650	159	4.80	433	568	65
Yamamoto et al. (2002) [38]	13	304.2-955.50	101.4-318.5	3.20-10.30	294		23.2-52.2
Li et al. (2003) [39]	4	300	100	16.00	235	370	148.9-156.7
Giakoumelis e Lam (2004) [40]	6	300-300.5	114.3-115	3.84-5.02	343-365		31.9-104.9
Sakino et al. (2004) [41]	36	366-1083	108-450	2.96-6.47	279-853		25.4-85.1
Han e Yao (2004) [42]	17	300-2000	100-200	3.00	304		59
Fam et al. (2004) [43]	1	457	152	3.12	347		55
Gopal e Manoharan (2004) [44]	2	1555	76	2.00	280	340	52
Han et al. (2005) [45]	26	180-750	60-250	1.87-2.00	282-404	358-514	75.63-80.32
Zeghiche e Chaoui (2005) [46]	15	2000-4000	159.6-160.3	4.96-5.20	270-283		40-102

Schneider (2006) [47]	6	636-735	164.1-169	1.50-5.70	371-452	0	155.7-176.2
De Nardin e El Debs (2007) [48]	2	1200	127	3.20-4.85	329.1-355	401.3-414.6	47.7-59.3
Gupta et al. (2007) [49]	72	340	47.28-112.56	1.87-2.89	360		25.15-38.32
Yu et al. (2007) [50]	6	510-650	165-219	2.72-4.78	350		46.3-77.2
Han et al. (2008) [51]	16	600	206	2.83	363	450	74
Yu et al. (2008) [52]	4	300	100	1.90	404		122
Liew e Xiong (2009) [53]	1	708-3078	219	6.30	300-405	484-518	37-139
Oliveira et al. (2009) [54]	16	342.9-800.1	114	3.35	287		32.7-105.5
Perea (2010) [55]	18	5486.4-7924.8	127.5-200	3.76-7.94	289.58-317.16		34.47-82.74
Liew e Xiong (2010) [56]	4	591	219	6.30	300		149-175
Liew e Xiong (2010) [57]	4	591	219	4.90-9.70	377-381		54-185
Liao et al. (2011) [58]	2	740	180	3.80	360	448	64
Lee et al. (2011) [59]	2	900-1080	300-360	6.00-12.00	479-498	567-631	32
Yang e Han (2011) [60]	2	450	150	3.00	324	467	59
Liew e Xiong (2012) [61]	12	200-600	114.67-219-43	3.54-9.69	377-428		165-176
Xiong (2012) [62]	14	250-600	114.3-219.1	3.60-6.30	300-428		163-193.3
Xue et al. (2012) [63]	3	700	219	3.00-5.00	313	418	63
Ellobody et al. (2012) [64]	4	300-1200	100	2.00	324	651	39-42
Abdalla et al. (2013) [65]	6	250-350	114-167	3.10-5.60	350		44-60
Guler et al. (2013) [66]	7	300	75.84-76.21	2.51-3.31	278-305	374-402	145
Abed et al. (2013) [67]	6	250-350	114-167	3.10-5.60	300		44-60
Portolés et al. (2013) [68]	6	2135	159	6.00	394-494		37.7-120.5
Ren et al. (2014) [69]	2	595	165	2.92	389	532	61
Lu et al. (2015) [70]	36	387-399	129-133	3.00- 5.00	306	417	53.3-76.40
Ekmeçyapar e Al-Eliwi (2016) [71]	18	299.46-899.54	114	2.74-5.90	235-355		56,2-107,2
Liew et al. (2016) [72]	27	210-4195	114.3-273	3.60-16.00	374-779	505-846	51.6-193.3
Xiong et al. (2017) [74]	18	210-600	114.3-219.1	3.60-10.00	300-428	467-519	51.6-193.3
Xiong et al. (2017) [73]	2	4195	219.1-273	10.00-16.00	374-412	521-551	180-186
Chen et al. (2018) [75]	12	342	107.9-114.9	2.09-8.03	251.8-304.3	370.8-421.1	59.0-130.8

Os modelos expostos nos resultados deste estudo possuem força aplicada integralmente a seção mista, demais estudos não estão inclusos por focarem na interface aço-concreto através de resultados obtidos através de força aplicada somente na seção de concreto.

5 BASE DE DADOS DE PILARES MISTOS TUBULARES CIRCULARES

Os estudos de Goode [76] e Wu [77] reuniram respectivamente 1792 e 1514 resultados de 92 e 104 referenciais experimentais com pilares mistos tubulares circulares e retangulares. Tao et al. [78] reuniu 2194 resultados, sendo destes, 1232 para modelos circulares. Kang et al. [17] reuniu 904 resultados de modelos circulares, sendo destes, 484 para modelos curtos e 420 para modelos esbeltos. Este estudo reúne 557 resultados para modelos sob força concêntrica.

Referências em que a resistência característica à compressão do concreto (f_{ck}) foi obtida através de amostras cúbicas foram convertidas utilizando a tabela desenvolvida por Chen et al. [75] obtida no estudo de Yu et al. [52].

Tabela 4: Relação aproximada entre resistência característica à compressão do concreto (f_{ck}) obtida em amostra cúbica e amostra cilíndrica.

Classe do concreto	C50	C60	C70	C80	C90	C100	C110	C120
Cubo	50	60	70	80	90	110	110	120
Cilindro	41	51	60	70	80	90	100	110

A Figura 1 ilustra o histograma de exemplares sob força axial concêntrica estudados em relação a propriedades geométricas e mecânicas. A Figura 1 (a) ilustra a distribuição de exemplares em relação ao índice de esbeltez global (L/D), demonstrando que 75,11% dos resultados se referem a pilares mistos curtos, ou seja, com relação $L/D \leq 4$, então, pilares mistos circulares esbeltos contemplam apenas 24,89% dos experimentos realizados, seguindo a tendência citada por Kang et al. [17].

A Figura 1 (b) ilustra a distribuição de exemplares em relação ao índice de esbeltez local (D/t), onde relações D/t entre 25 e 45 incluem 68,77% dos resultados listados, ainda que, em modelos sob força axial concêntrica haja um interesse no comportamento local do pilar misto, apenas 24,05% dos exemplares possuem relações D/t maiores que 50. Quanto aos parâmetros diâmetro e espessura, 79,54% dos resultados se referem a pilares mistos com diâmetro entre 100 e 200 mm, apenas 4,64 % dos resultados se referem a pilares mistos com diâmetro acima de 300 mm. 16,88% dos resultados se referem a pilares mistos com espessura de tubo menor que 2 mm, 40,93% para espessuras entre 2 mm e 4 mm, onde apenas 6,96 % dos resultados se referem a espessuras acima de 10 mm.

A Figura 1 (c) ilustra a distribuição de exemplares em relação a resistência do aço (f_y), onde 45,57% dos exemplares possuem resistência menor que 325 MPa e apenas 9,28% dos exemplares possuem resistência maior que 500 MPa. Uma melhor distribuição é indicada através da Figura 1 (d), que ilustra a distribuição de exemplares em relação a resistência característica à compressão do concreto (f_{ck}), onde 32,11 % dos exemplares possuem resistência entre 25 MPa e 50 MPa, 27,43% com resistência entre 50 MPa e 75 MPa e, apesar de 12,66% dos exemplares possuírem resistência entre 75 MPa e 100 MPa, 17,72% dos exemplares possuem resistência acima de 150 MPa.

Figura 1: Histograma de exemplares sob força axial concêntrica.

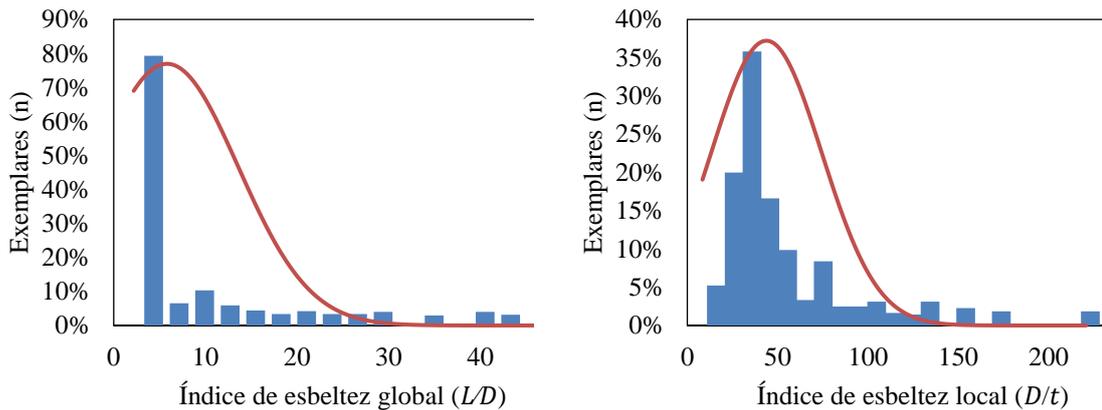


Figura 1 (a): Distribuição de exemplares em relação ao índice de esbelteza global (L/D).

Figura 1 (b): Distribuição de exemplares em relação ao índice de esbelteza local (D/t).

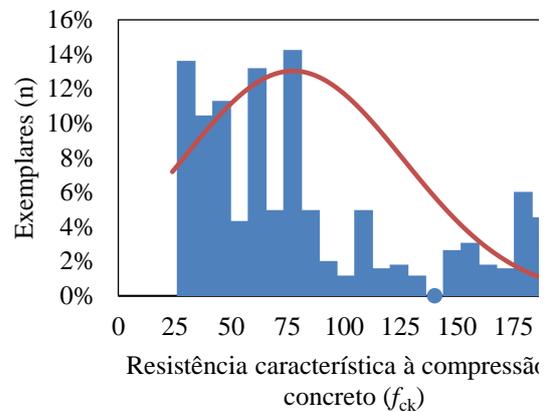
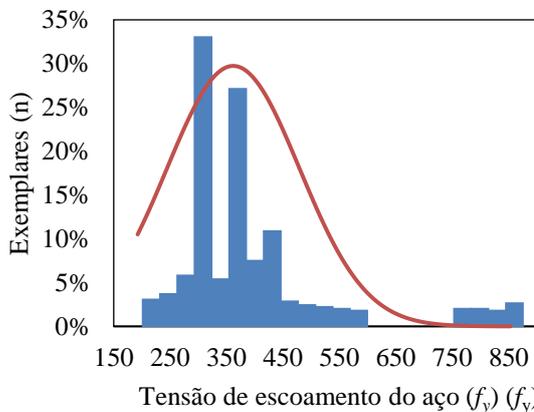


Figura 1 (c): Distribuição de exemplares em relação a tensão de escoamento do aço (f_y).

Figura 1 (d): Distribuição de exemplares em relação a resistência característica à compressão do concreto (f_{ck}).

Como as propriedades dos modelos foram obtidas de estudos com propósitos acadêmicos, alguns casos podem não representar a realidade de estruturas reais, mesmo assim, podem representar grande variedade de propriedades existentes, principalmente propriedades mecânicas. Resultados de propriedades geométricas são demonstrados com parâmetros de esbelteza. Modelos elaborados em laboratório possuem menores dimensões de diâmetro e comprimento comparado a estruturas reais, no entanto, relações de esbelteza aproximadas.

6 RESULTADOS

Uma maneira de analisar a influência de variáveis no comportamento de um pilar misto é utilizar parâmetros de desempenho. Além da resistência última (N_u), parâmetros

de desempenho como índice de resistência (SI), fator de confinamento (ξ), índice de contribuição do concreto (CCR) e tensão de confinamento (f_1) foram analisados.

Ainda existem demais parâmetros para quantificar a rigidez e ductilidade de uma seção mista. O índice de resistência residual (N_{res}/N_u) contabiliza o ganho de ductilidade propiciado pela seção mista. O termo (N_{res}) se refere a força resistente residual após o pilar misto atingir o pico de resistência última e (N_u) se refere a resistência última obtida. Não abordado a seguir devido o termo (N_{res}) não estar presente em alguns estudos. O índice de ductilidade ($DI = \varepsilon_{85}/\varepsilon_u$) tem objetivo de quantificar a ductilidade do pilar misto [80]. O termo (ε_u) se refere a deformação referente a resistência última (N_u) e (ε_{85}) a deformação quando a força aplicada atinge $0.85(N_u)$. Não abordado a seguir devido informações sobre a tensão x deformação de todos modelos ensaiados não estar presente em alguns estudos.

6.1 RESISTÊNCIA ÚLTIMA (N_U) EM PILARES MISTOS SOB FORÇA AXIAL CONCÊNTRICA

A resistência última (N_u) é a máxima força resistente ou o primeiro pico de capacidade de carga se a força máxima for obtida abaixo da deformação correspondente de 0.01 [78] [81], ou seja, é definido como a força resistente correspondente com a deformação limite de 0.01.

A Figura 2 ilustra a influência dos principais fatores que influenciam a resistência última (N_u) de pilares mistos tubulares circulares sob força axial concêntrica.

Na Figura 2 (a) é ilustrada a tendência em relação a esbeltez global (L/D). A medida em que se aumenta a relação L/D , há um decréscimo significativo na capacidade resistente do pilar misto. Resultados obtidos por Zeghiche e Chaoui [46] indicaram que aumentando a relação L/D , propiciará falha por instabilidade global, neste caso, a falha ocorre antes das deformações necessárias para gerar efeito de confinamento. Oliveira et al. [54] identificaram que modelos com grandes relações L/D apresentam baixa deformação, instabilidades globais ocorrem antes do concreto apresentar sua inteira capacidade e deformações radiais do núcleo de concreto são inexpressivas, evitando a mobilização de tensões de confinamento do tubo de aço [54].

Na Figura 2 (b) é ilustrada a tendência em relação a esbeltez local (D/t). Schneider [29] identificou que a tensão no núcleo de concreto é 30 % maior que a resistência em tubos de pequeno diâmetro, por outro lado, a tensão no núcleo de concreto para grandes

diâmetros foi de apenas 15 %. Huang et al. [36] identificaram que o pico para relações B/t ou D/t elevadas apresentam resultados semelhantes ao concreto não confinado, e isto vale para demais seções transversais, já que Ren et al. [69] avaliou seções transversais de formato circular, triangular, octogonal, leque, D , $1/4$ de seção circular e $1/2$ de seção circular e para todas, aumentando a relação B/t ou D/t houve redução na capacidade resistente. Em termos de ductilidade, Fujimoto et al. [82] identificaram que há melhora quando o concreto é confinado em tubo com pequena relação D/t , em pilares mistos com uma relação D/t extremamente alta, instabilidades locais no tubo de aço ocorrem antes que o tubo restrinja o concreto.

A esbeltez global (L/D) impacta diretamente a capacidade e o comportamento de pilares mistos tubulares circulares, por outro lado, a esbeltez local (D/t) possui menor impacto direto.

Na Figura 2 (c) é ilustrada a tendência em relação a resistência aço (f_y). Na Figura 2 (d) é ilustrada a tendência em relação a resistência do concreto (f_{ck}). Os efeitos da resistência do concreto (f_{ck}) e resistência do aço (f_y) agem como o esperado, quando se aumenta a resistência do concreto (f_{ck}) e a resistência do aço (f_y), a resistência última (N_u) aumenta. No entanto, é observado que o aumento da resistência última (N_u) é mais afetado pela alteração da relação L/D e D/t comparado ao acréscimo da resistência do concreto (f_{ck}).

Figura 2: Resistência última (N_u) em exemplares sob força axial concêntrica.

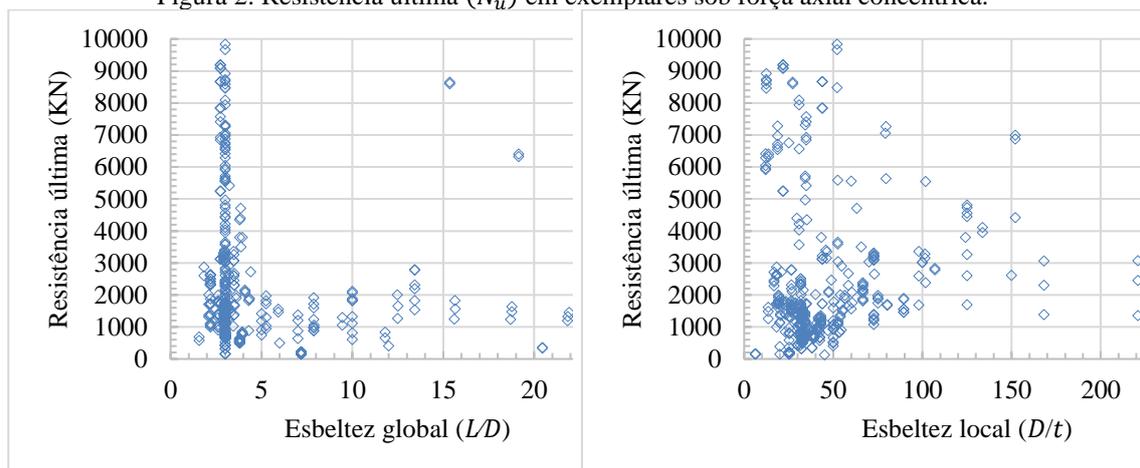


Figura 2 (a): Esbeltez global (L/D) x resistência última (N_u).

Figura 2 (b): Esbeltez local (D/t) x resistência última (N_u).

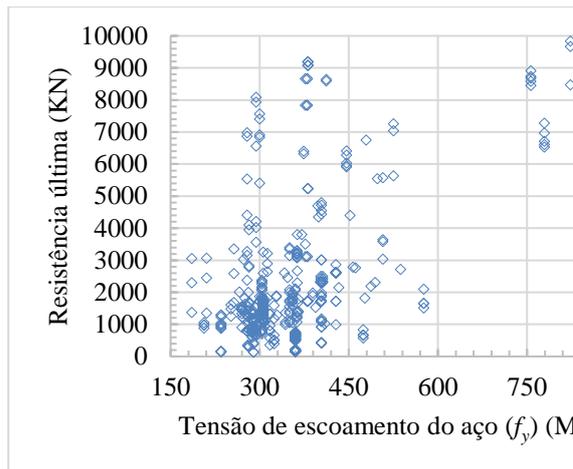


Figura 2 (c): Tensão de escoamento do aço (f_y) x resistência última (N_u).

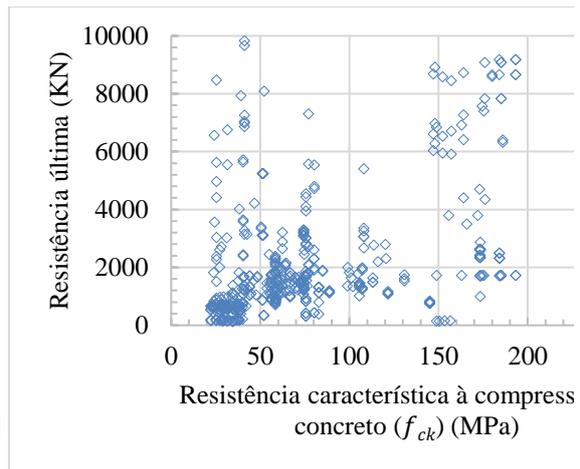


Figura 2 (d): Resistência característica à compressão do concreto (f_{ck}) x resistência última (N_u).

6.2 ÍNDICE DE RESISTÊNCIA (SI) EM PILARES MISTOS SOB FORÇA AXIAL CONCÊNTRICA

Índices de performance como o índice SI são definidos para determinar o grau de resistência e ampliação da ductilidade em pilares mistos. O índice de resistência (SI) pode ser introduzido para acessar a capacidade de carga de uma seção mista relativa em relação a soma da resistência individual de cada componente [45] [83] [66] [68] [86] [84] [85], sendo expresso pela Equação 1.

$$SI = \frac{N_u}{A_s f_y + A_c 0.80 f_{ck}} \quad \text{Equação 1}$$

Onde (N_u) é a resistência última do pilar misto obtido através de ensaios experimentais, modelos numéricos ou normativos. A_s e A_c são as áreas da seção transversal do tubo de aço e do núcleo de concreto respectivamente, f_y é a tensão de escoamento do aço e f_{ck} é a resistência característica à compressão do concreto. O fator 0.80 é utilizado para cálculo da resistência da seção transversal de concreto para compensar incertezas inerentes ao próprio concreto. Altos valores para o índice SI refletem uma interação positiva entre o tubo de aço e o núcleo de concreto, como o aumento da tensão resistente do concreto causado pelo efeito de confinamento e o atraso no surgimento de imperfeições locais no tubo de aço causado pela restrição lateral propiciada pela presença do núcleo de concreto.

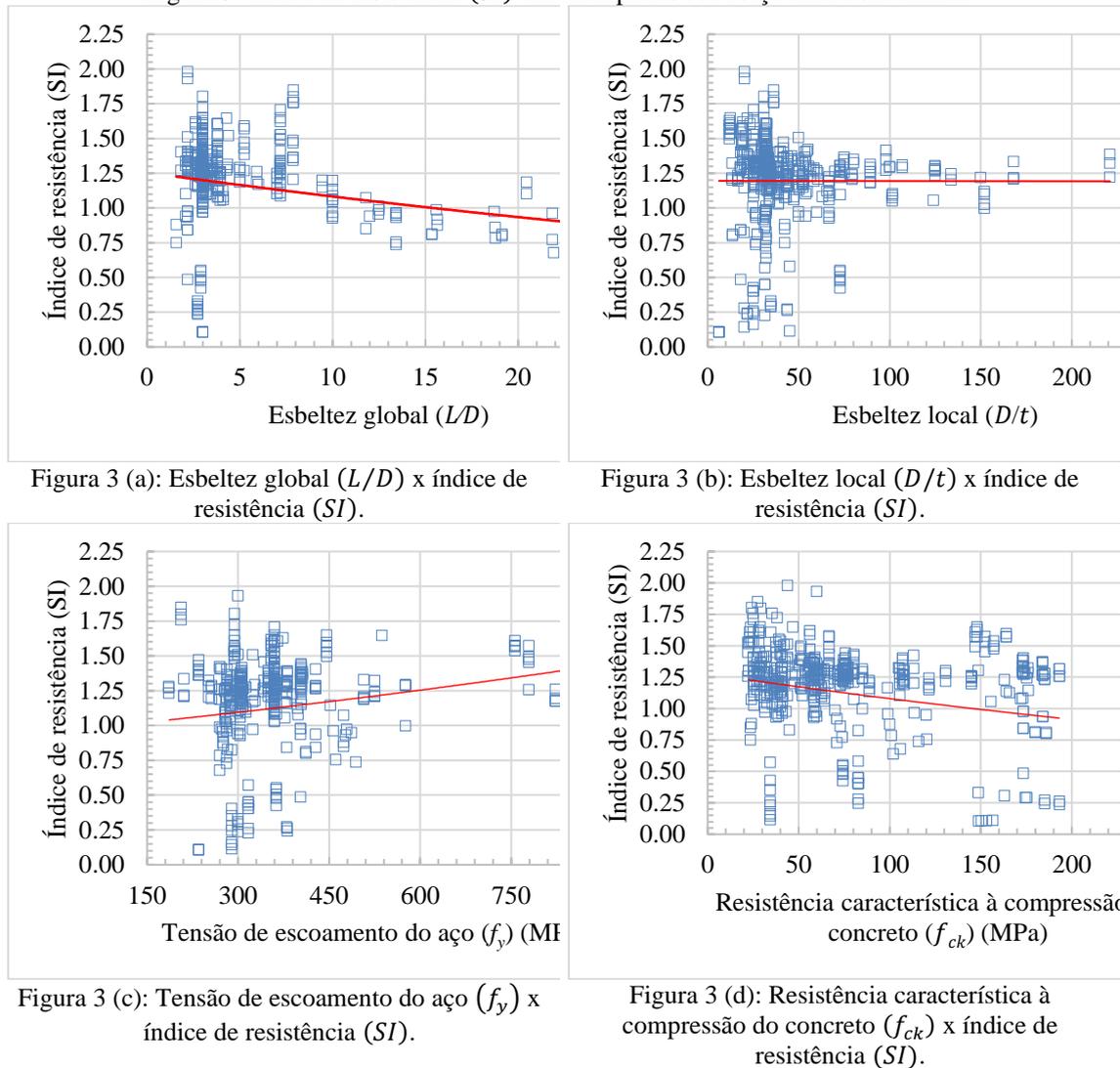
A Figura 3 ilustra a influência dos principais fatores sobre o índice de resistência (SI) em pilares mistos tubulares circulares sob força axial concêntrica.

Na Figura 3 (a) é ilustrada a tendência em relação a esbeltez global (L/D). Pode ser observado que a relação L/D possui impacto direto na capacidade do pilar misto, a relação é aproximadamente linear e como a relação L/D aumenta a capacidade do pilar misto diminuí. Isto significa que a relação L/D poderia ser um dos principais parâmetros no dimensionamento de um pilar misto, concentrando os valores próximos a unidade com relações menores que 10.

A Figura 3 (b) é ilustrada a tendência em relação a esbeltez local (D/t), ainda que com pouco impacto direto, concentrando os resultados próximos a unidade para relações menores que 50 [71] [40], há uma leve tendência em aumentar o índice SI aumentando a espessura do tubo de aço. A razão é de que maiores espessuras proporcionarão maior confinamento ao núcleo de concreto e aumentarão a capacidade de resistir a instabilidades locais.

Na Figura 3 (c) é ilustrada a tendência em relação a resistência do aço (f_y). Na Figura 3 (d) é ilustrada a tendência em relação a resistência do concreto (f_{ck}). Valores do índice SI acima da unidade, mesmo favoráveis para a utilização de determinadas características geométricas e propriedades mecânicas, podem não representam a capacidade do tubo de aço confinar efetivamente o núcleo de concreto. Portanto, um mesmo tubo de aço confinando um concreto de alta ou ultra resistência, não exerce mesma magnitude de confinamento comparado quando este confina um concreto de resistência normal [71]. Há uma pequena tendência em relação ao acréscimo da resistência do aço (f_y) para o aumento do índice SI , ao contrário, com o acréscimo da resistência do concreto (f_{ck}) há uma redução no índice SI . Apesar da tendência ser pequena, é evidente que para aumentar o índice SI é preferível aumentar a resistência do aço (f_y) antes que a resistência do concreto (f_{ck}), já que a resistência do concreto (f_{ck}) não possui influência considerável na melhora do índice SI .

Figura 3: Índice de resistência (SI) em exemplares sob força axial concêntrica.



A interação entre a relação D/t e a resistência do concreto (f_{ck}), apresenta uma contribuição de concretos de alta resistência maior para modelos compostos por tubos com baixas relações D/t [71][86].

6.3 FATOR DE CONFINAMENTO (ξ) EM PILARES MISTOS SOB FORÇA AXIAL CONCÊNTRICA

O fator de confinamento (ξ) pode ser empregado para seções tubulares circulares para representar a efetividade do comportamento misto da seção transversal na capacidade em confinar o concreto e resistir a instabilidades locais [86] [45] [81]. O fator ξ é comumente adotado para avaliar a performance do pilar misto [87]. Considerando como o principal fator que afeta a interação entre tubo de aço e núcleo de concreto [79]. A

relação entre a resistência do tubo de aço e do núcleo de concreto [66] é expressa pela Equação 2.

$$\xi = \frac{A_s \cdot f_y}{A_c \cdot f_{ck}} \quad \text{Equação 2}$$

Altos valores para fator ξ refletem a capacidade do tubo de aço realizar uma restrição lateral ao concreto, mobilizando tensões de confinamento.

A Figura 4 ilustra a influência dos principais fatores sobre o fator de confinamento (ξ) em pilares mistos tubulares circulares sob força axial concêntrica.

Na Figura 4 (a) é ilustrada a tendência em relação a esbelteza global (L/D), demonstrando que pilares mistos curtos apresentam maior fator ξ pelo predomínio do comportamento local em relação ao comportamento global do pilar misto, então, o efeito de confinamento é esperado em pilares mistos curtos e não em pilares mistos esbeltos.

Na Figura 4 (b) é ilustrada a tendência em relação a esbelteza local (D/t), demonstrando que o acréscimo da relação D/t reduz significativamente o fator ξ , além disso, esta perda potencial de confinamento não reduz apenas a rigidez do pilar misto, mas também N_u [67]. O aumento da relação D/t é associado a presença de tubos de paredes finas, que tendem a falhar predominante por instabilidades locais, reduzindo o potencial de confinamento [49] [67] [75]. Alta tensão circunferencial ou radial resulta em um acréscimo significativo na força última do pilar misto por representar o efeito de confinamento oriundo da ação mista adequada [88]. Aumentar a espessura do tubo de aço não contribuí apenas para a resistência ao cisalhamento, mas providencia maior confinamento lateral ao concreto. A grande pressão de confinamento através da face da fissura propicia maior capacidade de transferência de forças de cisalhamento e atrasa falhas locais [89]. Para um alto fator ξ , o deslocamento entre os planos de deslizamento é restringido pela pressão lateral provida pelo tubo de aço. O núcleo de concreto exhibe características plásticas sob alto índice de confinamento, resultando em protuberâncias na superfície de contato com o tubo de aço [75].

Na Figura 4 (c) é ilustrada a tendência em relação resistência do aço (f_y), demonstrando que aumentar a resistência do aço (f_y) contribuí significativamente para a melhora do confinamento. A ductilidade do pilar misto pode ser melhorada aumentando a taxa de contribuição do aço [74]. A resistência do aço (f_y) interfere significativamente

em pilares mistos com baixa fricção na interface aço-concreto, nestes, haverá baixa tensão vertical, mas mais grande será a tensão horizontal e mais significativa será o efeito de confinamento [90], como demonstram os estudos de [80] [42] [93] [90] [94].

Na Figura 4 (d) é ilustrada a tendência em relação a resistência do concreto (f_{ck}), demonstrando que, aumentar a resistência do concreto (f_{ck}) diminuí o fator ξ . Concretos de alto desempenho apresentam elevada retração, resultando em uma ligação pobre entre o concreto e o tubo de aço, reduzindo a ação mista. Micro poros e micro fissuras são menores que concretos de resistência normal, reduzindo a capacidade de expansão volumétrica, então, o efeito de confinamento do tubo de aço sob o núcleo de concreto não é tão significativa quanto em resistências normais [79].

Figura 4: Fator de confinamento (ξ) em exemplares sob força axial concêntrica.

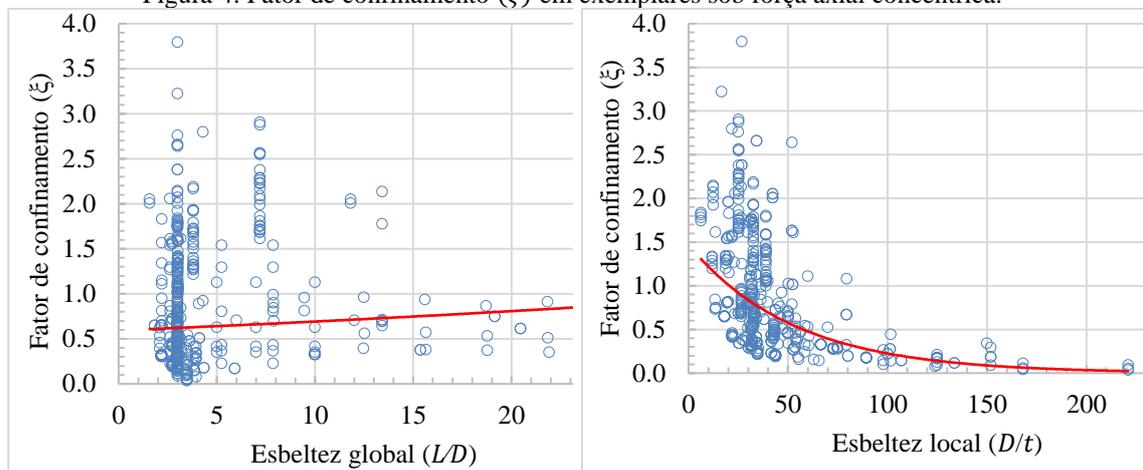


Figura 4 (a): Esbeltez global (L/D) x fator de confinamento (ξ).

Figura 4 (b): Esbeltez local (D/t) x fator de confinamento (ξ).

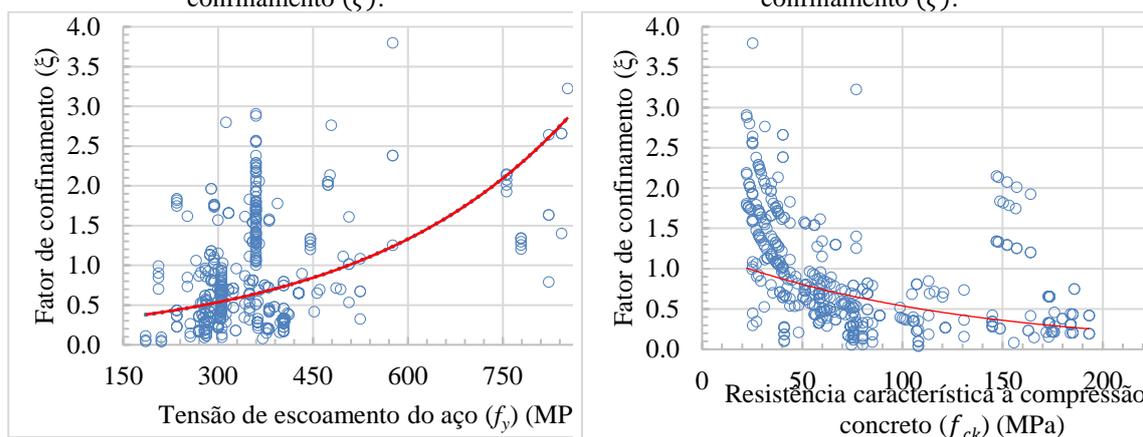


Figura 4 (c): Tensão de escoamento do aço (f_y) x fator de confinamento (ξ).

Figura 4 (d): Resistência característica à compressão do concreto (f_{ck}) x fator de confinamento (ξ).

A interação entre a relação D/t e a resistência do aço (f_y) possuem influência considerável no efeito de confinamento, pilares mistos com tubos de grande diâmetro e aço com elevada resistência (f_y) possuem seu desempenho altamente influenciado pela resistência do aço (f_y) [71].

A interação entre a relação D/t e a resistência do concreto (f_{ck}), influencia a ductilidade do pilar misto, que decresce com o acréscimo na resistência do concreto (f_{ck}) para grandes relações (D/t), mas para pequenas relações D/t , o inverso é verdadeiro [65] [67].

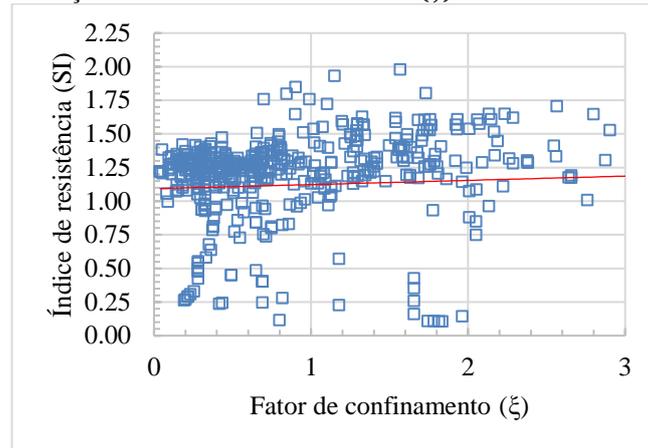
A interação entre resistência do aço (f_y) e resistência do concreto (f_{ck}), faz com que o nível de confinamento aumente com o acréscimo na resistência do aço (f_y) e seja inversamente proporcional a resistência do concreto (f_{ck}) [73]. Ao aumentar a resistência do concreto (f_{ck}), a pressão de confinamento necessária aumenta, então, caso o tubo não tenha a resistência necessária, para qualquer acréscimo de confinamento além do necessário, irá resultar em uma melhora muito pequena [67].

Com o acréscimo do fator ξ , há um acréscimo gradual da performance dúctil do pilar misto. Quando há baixa tensão de confinamento, a relação tensão axial x deformação apresenta comportamento de amolecimento. Quando há presença de tensões de confinamento, a relação tensão x deformação, após um trecho curto de amolecimento, apresenta comportamento de endurecimento [75].

6.4 RELAÇÃO ENTRE FATOR DE CONFINAMENTO (ξ) E ÍNDICE DE RESISTÊNCIA (SI)

Aumentando o fator ξ , o índice SI aumenta de maneira estável. A Figura 5 ilustra a relação entre fator ξ e índice SI para modelos sob força axial concêntrica. Quando o fator ξ é relativamente baixo, ao aumentar seu valor, aumentará o valor do índice SI , no entanto, quando o fator ξ se aproxima do nível 1.0, aumentar o valor do fator ξ não apresenta efeito significativo no índice SI [70].

Figura 5: Relação entre fator de confinamento (ξ) e índice de resistência (SI).



6.5 RELAÇÃO ENTRE FATOR DE CONFINAMENTO (ξ) E ÍNDICE DE CONTRIBUIÇÃO DO CONCRETO (CCR)

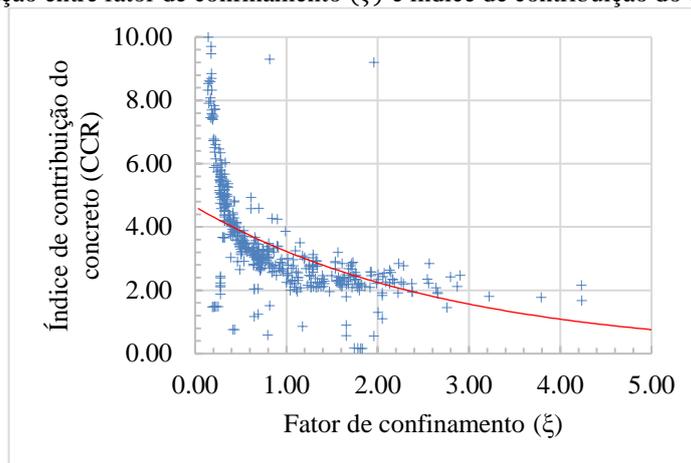
O índice de contribuição do concreto (CCR) pode ser expresso para contabilizar à amplificação da resistência do pilar misto devido a presença do concreto [66] [75], é expresso pela Equação 3.

$$CCR = \frac{N_u}{N_{u,hollow}} \quad \text{Equação 3}$$

Onde o termo (N_u) se refere a resistência última obtida do pilar misto preenchido por concreto e ($N_{u,hollow}$) se refere a resistência última obtida em um pilar de aço não preenchido por concreto através de ensaios experimentais, modelos numéricos ou modelos normativos.

A Figura 6 ilustra a relação entre fator ξ e índice CCR para modelos sob força axial concêntrica. A contribuição do núcleo de concreto em termos de índice CCR decresce com o aumento do fator ξ [75].

Figura 6: Relação entre fator de confinamento (ξ) e índice de contribuição do concreto (CCR).



6.6 RELAÇÃO ENTRE FATOR DE CONFINAMENTO (ξ) E TENSÃO DE CONFINAMENTO (f_1)

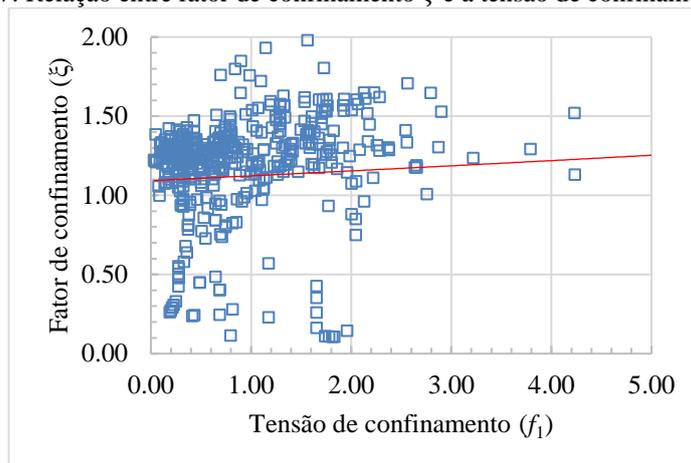
Mander et al. [95] propôs um modelo para concreto confinado aplicável a modelos circulares com reforços transversais. Neste modelo, a tensão de confinamento (f_1) é expressa pela Equação 4.

$$f_1 = \frac{0.2f_y t}{D} \quad \text{Equação 4}$$

Onde t é a espessura do tubo de aço e D é o diâmetro do tubo de aço.

A Figura 7 ilustra a relação entre o fator ξ e Tensão de confinamento (f_1) para modelos sob força axial concêntrica. No modelo proposto, a tensão de confinamento (f_1) despreza propriedades mecânicas do concreto, por outro lado, considera a resistência do aço (f_y) e propriedades geométricas da seção transversal. Como a magnitude da pressão de confinamento não é relativa à resistência do concreto (f_{ck}), mas afetada pela área transversal do pilar misto [73], a Figura 7 demonstra que reduzir a relação D/t e aumentar a resistência do aço (f_y) amplia a tensão de confinamento (f_1), ampliando o fator ξ .

Figura 7: Relação entre fator de confinamento ξ e a tensão de confinamento (f_1).



7 CONCLUSÃO

Os resultados dos exemplares experimentais presentes neste estudo proporcionaram importantes informações sobre o comportamento de pilares mistos tubulares circulares e apresentam a oportunidade para avaliar a contribuição das propriedades geométricas e mecânicas na capacidade destes elementos quando submetidos a força axial concêntrica. Este estudo reuniu 54 referências totalizando 557 resultados de modelos submetidos a força axial concêntrica. Os parâmetros índice de esbeltez global (L/D), índice de esbeltez local (D/t), resistência do concreto (f_{ck}) e a resistência do aço (f_y) foram analisados para verificar sua influência no desempenho estrutural de pilares mistos tubulares circulares. Além da resistência última (N_u), parâmetros de desempenho como: índice de resistência (SI), fator de confinamento (ξ), índice de contribuição do concreto (CCR) e tensão de confinamento (f_1) foram analisados. Baseado nos resultados deste estudo, as seguintes conclusões podem ser realizadas:

- O efeito de confinamento é esperado em pilares mistos com baixa relação L/D , modelos com grandes relações L/D são mais susceptíveis a instabilidade global, falhando antes que ocorra o ganho de resistência provido pelo efeito de confinamento.
- O aumento da relação D/t é associado a presença de tubos de paredes finas, que tendem a falhar predominante por instabilidades locais, reduzindo o potencial de confinamento, reduzindo a rigidez e a potencial resistência do pilar misto.
- Os efeitos da resistência do concreto (f_{ck}) e resistência do aço (f_y) agem como o esperado, quando se aumenta a resistência do concreto (f_{ck}) e a resistência do aço (f_y), há um acréscimo na resistência última (N_u). No entanto, geralmente o índice SI aumenta

com o acréscimo da resistência do aço (f_y) e decresce com o acréscimo na resistência do concreto (f_{ck}), da mesma maneira, o nível de confinamento aumenta com o acréscimo na resistência do aço (f_y) e é inversamente proporcional a resistência do concreto (f_{ck}).

- Geralmente, quanto maior o fator ξ , maior será o índice SI até que o fator ξ se aproxime da unidade, além da unidade, aumentar o fator ξ não amplifica significativamente o índice SI .
- O índice CRR decresce com o aumento do fator ξ .
- Reduzir a relação D/t e aumentar a resistência do aço (f_y) amplia a tensão de confinamento (f_1), ampliando o fator ξ .

REFERÊNCIAS

- [1] WAGNER, Leonardo Lunkes; CORRÊA, Ana Laura Stringhini; DE FREITAS, Denizard Batista. Revisão sobre a utilização de elementos pré-fabricados. Brazilian Journal of Development, v. 6, n. 10, p. 75455-75465, 2020.
- [2] OLIVEIRA, Douglas Henrique; SOARES, Renato Alberto Brandão; SANTOS, Victor Hugo Diniz. Comparação entre as vantagens da utilização de estrutura metálica e estrutura de concreto armado./Comparison between the advantages of using metallic structure and reinforced concrete structure. Brazilian Journal of Development, v. 6, n. 4, p. 17783-17793, 2020.
- [3] KURANOVAS, Artiomias et al. Load-bearing capacity of concrete-filled steel columns. Journal of civil engineering and management, v. 15, n. 1, p. 21-33, 2009.
- [4] 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, 2014.
- [5] SHANMUGAM, Nandivaram Elumalai; LAKSHMI, B. State of the art report on steel-concrete composite columns. Journal of constructional steel research, v. 57, n. 10, p. 1041-1080, 2001.
- [6] ELYOUSSEF, Mostafa; ELGRIW, Muad; ABED, Farid. FE Parametric study of the Compressive Behavior of CFSTs. In: 2019 8th International Conference on Modeling Simulation and Applied Optimization (ICMSAO). IEEE, 2019. p. 1-5. Engineering, v. 117, n. 3, p.
- [7] PANCHAL, Devang R; PATEL, Yameen. Experimental and Computational Parametric Analysis of CFST and CFFT Columns. International Journal Of Engineering

And Advanced Technology, [s.l.], v. 8, n. 6, p.2701-2706, 30 ago. 2019. Blue Eyes Intelligence Engineering and Sciences Engineering and Sciences Publication - BEIESP.699-714, 1991.

[8] SHAMS, Mohammad; SAADEGHVAZIRI, M. Ala. State of the art of concrete-filled steel tubular columns. *Structural Journal*, v. 94, n. 5, p. 558-571, 1997.

[9] LEE, Seong-Hui et al. Behavior of high-strength circular concrete-filled steel tubular (CFST) column under eccentric loading. *Journal of Constructional Steel Research*, v. 67, n. 1, p. 1-13, 2011.

[10] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI). *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-14): Commentary on Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318R-14)*, 2014.

[11] AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION (AISC). *Specification for Structural Steel Buildings (AISC 360-10)*, 2010.

[12] AS/NZS2327, *Composite Steel-Concrete Construction for Buildings*, Standard Australian/Standard New Zealand, 2017.

[13] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). *Design of composite steel and concrete structures - Part 1-1: general rules and rules for buildings. EN 1994- 1-1 Eurocode 4*, Brussels; 2004.

[14] DBJ/T 13-51-2010. *Technical Specifications for Concrete-Filled Steel Tubular Structures*, in:DBJ,Fuzhou,2010.

[15] ARCHITECTURAL INSTITUTE OF JAPAN (AIJ). *Recommendations for design and construction of concrete filled steel tubular structures*. 2001.

[16] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios (ABNT NBR 8800:2008)*. Rio de Janeiro, 2008

[17] KANG, Won-Hee et al. Design strength of concrete-filled steel columns. *Advanced Steel Construction*, v. 11, n. 2, p. 165-184, 2015.

[18] 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, 2013.

[19] THAI, Son et al. Concrete-filled steel tubular columns: Test database, design and calibration. *Journal of Constructional Steel Research*, v. 157, p. 161-181, 2019.

[20] UY, Brian. High-strength steel–concrete composite columns for buildings. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings*, v. 156, n. 1, p. 3-14, 2003.

- [21] LIEW, JY Richard; XIONG, D. X. Ultra-high strength concrete filled composite columns for multi-storey building construction. *Advances in Structural Engineering*, v. 15, n. 9, p. 1487-1503, 2012.
- [22] GARDNER, Noel J.; JACOBSON, E. Ronald. Structural behavior of concrete filled steel tubes. In: *Journal Proceedings*. 1967. p. 404-413.
- [23] KNOWLES, Robert B.; PARK, Robert. Strength of concrete filled steel columns. *Journal of the structural division*, 1969.
- [24] GARDNER, Noel J. Use of spiral welded steel tubes in pipe columns. In: *Journal Proceedings*. 1968. p. 937-942.
- [25] TOMII, Masahide. Experimental studies on concrete filled steel tubular stub columns under concentric loading. In: *Proceedings of International Colloquium on Stability of Structures Under Static and Dynamic Loads, SSRC/ASCE/Washington, DC*. 1977.
- [26] SAKINO, Kenji. Behavior of concrete filled steel tubular stub columns under concentric loading. In: *Proceedings of the Third International Conference on Steel-Concrete Composite Structures*, 1991. 9. 1991. p. 25-30.
- [27] PRION, Helmut GL; BOEHME, Jens. Beam-column behaviour of steel tubes filled with high strength concrete. *Canadian journal of civil engineering*, v. 21, n. 2, p. 207-218, 1994.
- [28] KATO, B. Compressive strength and deformation capacity of concrete-filled tubular stub columns (Strength and rotation capacity of concrete-filled tubular columns, Part 1). *Journal of Structural and Construction Engineering, AIJ*, v. 468, p. 183-191, 1995.
- [29] SCHNEIDER, Stephen P. Axially loaded concrete-filled steel tubes. *Journal of structural Engineering*, v. 124, n. 10, p. 1125-1138, 1998.
- [30] SAISHO, M.; ABE, T.; NAKAYA, K. Ultimate bending strength of high-strength concrete filled steel tube column. *Journal of Structural and Construction Engineering, AIJ*, v. 523, n. 1, p. 133-140, 1999.
- [31] KILPATRICK, Andrew E.; RANGAN, B. Vijaya. Influence of interfacial shear transfer on behavior of concrete-filled steel tubular columns. *Structural Journal*, v. 96, n. 4, p. 642-648, 1999.
- [32] CAMPIONE, Giuseppe et al. Strength of hollow circular steel sections filled with fibre-reinforced concrete. *Canadian journal of civil engineering*, v. 27, n. 2, p. 364-372, 2000.
- [33] CAMPIONE, G. et al. Behavior of fiber reinforced concrete-filled tubular columns in compression. *Materials and Structures*, v. 35, n. 6, p. 332-337, 2002.

- [34] O'SHEA, M. D., & BRIDGE, R. Q. Design of Circular Thin-Walled Concrete Filled Steel Tubes. *Journal of Structural Engineering*, 126(11), 1295–1303, 2000.
- [35] MEI, Hong et al. Confinement effects on high-strength concrete. *Structural Journal*, v. 98, n. 4, p. 548-553, 2001.
- [36] HUANG, C. S. et al. Axial load behavior of stiffened concrete-filled steel columns. *Journal of Structural Engineering*, v. 128, n. 9, p. 1222-1230, 2002.
- [37] JOHANSSON, Mathias; GYLLTOFT, Kent. Mechanical behavior of circular steel–concrete composite stub columns. *Journal of structural engineering*, v. 128, n. 8, p. 1073-1081, 2002.
- [38] YAMAMOTO, T.; KAWAGUCHI, J.; MORINO, S. Experimental study of the size effect on the behavior of concrete filled circular steel tube columns under axial compression. *Journal of Structural and Construction Engineering*, n. 561, p. 237-244, 2002.
- [39] LI, Gengying; ZHAO, Xiaohua; CHEN, Liqiang. Improve the strength of concrete-filled steel tubular columns by the use of fly ash. *Cement and concrete research*, v. 33, n. 5, p. 733-739, 2003.
- [40] GIAKOUMELIS, Georgios; LAM, Dennis. Axial capacity of circular concrete-filled tube columns. *Journal of Constructional Steel Research*, v. 60, n. 7, p. 1049-1068, 2004.
- [41] 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.
- [42] 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.
- [43] FAM, Amir; QIE, Frank S.; RIZKALLA, Sami. Concrete-filled steel tubes subjected to axial compression and lateral cyclic loads. *Journal of Structural Engineering*, v. 130, n. 4, p. 631-640, 2004.
- [44] GOPAL, S. Ramana; MANOHARAN, P. Devadas. Tests on fiber reinforced concrete filled steel tubular columns. *Steel and Composite Structures*, v. 4, n. 1, p. 37-48, 2004.
- [45] 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
- [46] ZEGHICHE, J., & CHAOUI, K. An experimental behaviour of concrete-filled steel tubular columns. *Journal of Constructional Steel Research*, 61(1), 53–66, 2005.

- [47] SCHNEIDER, H. (2006), “Zum tragverhalten kurzer, umschnürter, kreisförmiger, druckglieder aus ungefasertem UHFB”, Ph.D. Dissertation, University of Leipzig, Leipzig, Germany.
- [48] DE NARDIN, S.; EL DEBS, A. L. H. C. Axial load behaviour of concrete-filled steel tubular columns. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings*, v. 160, n. 1, p. 13-22, 2007.
- [49] GUPTA, P. K.; SARDA, S. M.; KUMAR, M. S. Experimental and computational study of concrete filled steel tubular columns under axial loads. *Journal of Constructional Steel Research*, v. 63, n. 2, p. 182-193, 2007.
- [50] YU, Zhi-wu; DING, Fa-xing; CAI, C. S. Experimental behavior of circular concrete-filled steel tube stub columns. *Journal of constructional steel research*, v. 63, n. 2, p. 165-174, 2007.
- [51] HAN, Lin-Hai; LIU, Wei; YANG, You-Fu. Behaviour of concrete-filled steel tubular stub columns subjected to axially local compression. *Journal of Constructional Steel Research*, v. 64, n. 4, p. 377-387, 2008.
- [52] 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.
- [53] LIEW, JY Richard; XIONG, D. X. Effect of preload on the axial capacity of concrete-filled composite columns. *Journal of Constructional Steel Research*, v. 65, n. 3, p. 709-722, 2009.
- [54] DE OLIVEIRA, Walter Luiz Andrade et al. Influence of concrete strength and length/diameter on the axial capacity of CFT columns. *Journal of Constructional Steel Research*, v. 65, n. 12, p. 2103-2110, 2009.
- [55] PEREA, T. Analytical and experimental study on slender concrete-filled steel tube columns and beam-columns. Tese (Doutorado)—Georgia Institute of Technology, Atlanta, U.S.A., 2010.
- [56] LIEW, J. Y. R.; XIONG, D. X. Experimental investigation on tubular columns infilled with ultra-high strength concrete. 2010.
- [57] LIEW, J. Y. R.; XIONG, D. X. Ultra-high strength concrete filled columns for highrise buildings. In: *Proceedings of the 4th International Conference on Steel & Composite Structures*, Sydney, Australia. 2010. p. 82-93.
- [58] LIAO, Fei-Yu; HAN, Lin-Hai; HE, Shan-Hu. Behavior of CFST short column and beam with initial concrete imperfection: Experiments. *Journal of Constructional Steel Research*, v. 67, n. 12, p. 1922-1935, 2011.

- [59] LEE, Seong-Hui et al. Behavior of high-strength circular concrete-filled steel tubular (CFST) column under eccentric loading. *Journal of Constructional Steel Research*, v. 67, n. 1, p. 1-13, 2011.
- [60] YANG, You-Fu; HAN, Lin-Hai. Behaviour of concrete filled steel tubular (CFST) stub columns under eccentric partial compression. *Thin-Walled Structures*, v. 49, n. 2, p. 379-395, 2011.
- [61] LIEW, JY Richard; XIONG, D. X. Ultra-high strength concrete filled composite columns for multi-storey building construction. *Advances in Structural Engineering*, v. 15, n. 9, p. 1487-1503, 2012.
- [62] Xiong, D.X. (2012), "Structural behaviour of concrete filled steel tube with high strength materials", Ph.D. Dissertation, National University of Singapore, Singapore
- [63] XUE, Jun-Qing; BRISEGHHELLA, Bruno; CHEN, Bao-Chun. Effects of debonding on circular CFST stub columns. *Journal of Constructional Steel Research*, v. 69, n. 1, p. 64-76, 2012.
- [64] ELLOBODY, Ehab; GHAZY, Mariam F. Experimental investigation of eccentrically loaded fibre reinforced concrete-filled stainless steel tubular columns. *Journal of constructional steel research*, v. 76, p. 167-176, 2012.
- [65] ABDALLA, Suliman; ABED, Farid; ALHAMAYDEH, Mohammad. Behavior of CFSTs and CCFSTs under quasi-static axial compression. *Journal of Constructional Steel Research*, v. 90, p. 235-244, 2013.
- [66] GULER, Soner; ÇOPUR, Alperen; AYDOGAN, Metin. Axial capacity and ductility of circular UHPC-filled steel tube columns. *Magazine of concrete research*, v. 65, n. 15, p. 898-905, 2013.
- [67] ABED, Farid; ALHAMAYDEH, Mohammad; ABDALLA, Suliman. Experimental and numerical investigations of the compressive behavior of concrete filled steel tubes (CFSTs). *Journal of Constructional Steel Research*, v. 80, p. 429-439, 2013.
- [68] PORTOLÉS, J. M.; SERRA, E.; ROMERO, Manuel L. Influence of ultra-high strength infill in slender concrete-filled steel tubular columns. *Journal of constructional steel research*, v. 86, p. 107-114, 2013.
- [69] REN, Qing-Xin et al. Experiments on special-shaped CFST stub columns under axial compression. *Journal of Constructional Steel Research*, v. 98, p. 123-133, 2014.
- [70] LU, Yiyan et al. Behavior of steel fiber reinforced concrete-filled steel tube columns under axial compression. *Construction and Building Materials*, v. 95, p. 74-85, 2015.
- [71] EKMEKYAPAR, Talha; AL-ELIWI, Baraa JM. Experimental behaviour of circular concrete filled steel tube columns and design specifications. *Thin-Walled Structures*, v. 105, p. 220-230, 2016.

- [72] LIEW, JY Richard; XIONG, Mingxiang; XIONG, Dexin. Design of concrete filled tubular beam-columns with high strength steel and concrete. In: Structures. Elsevier, 2016. p. 213-226.
- [73] XIONG MX, Xiong DX and Liew JYR. Axial performance of short concrete filled steel tubes with high- and ultra-high-strength materials. *Engineering Structures* 136(4): 494–510, 2017.
- [74] XIONG, Ming-Xiang; XIONG, De-Xin; LIEW, JY Richard. Behaviour of steel tubular members infilled with ultra high strength concrete. *Journal of Constructional Steel Research*, v. 138, p. 168-183, 2017.
- [75] CHEN, Shiming et al. Structural behavior of UHPC filled steel tube columns under axial loading. *Thin-Walled Structures*, v. 130, p. 550-563, 2018.
- [76] GOODE, C. D. A review and analysis of over one thousand tests on concrete filled steel tube columns. In: *Proceedings of 8th International Conference on Steel-Concrete Composite and Hybrid Structures*, Harbin, China. 2006. p. 12-15.
- [77] WU, F. Y. Compressive behaviour of recycled concrete-filled steel tubes. College of Civil Engineering, Fuzhou University, China, 2006.
- [78] TAO, Zhong et al. Design of concrete-filled steel tubular members according to the Australian Standard AS 5100 model and calibration. *Australian Journal of Structural Engineering*, v. 8, n. 3, p. 197-214, 2008.
- [79] Chen ZY, Zhu JQ, Wu PG. High strength concrete and its application. Beijing: Tsinghua University Press; 1996 [in Chinese].
- [80] GE, Hanbin; USAMI, Tsutomu. Cyclic tests of concrete-filled steel box columns. *Journal of structural engineering*, v. 122, n. 10, p. 1169-1177, 1996.
- [81] UY, Brian; TAO, Zhong; HAN, Lin-Hai. Behaviour of short and slender concrete-filled stainless steel tubular columns. *Journal of Constructional Steel Research*, v. 67, n. 3, p. 360 378, 2011.
- [82] FUJIMOTO, Toshiaki et al. Behavior of eccentrically loaded concrete-filled steel tubular columns. *Journal of Structural Engineering*, v. 130, n. 2, p. 203-212, 2004.
- [83] TAO, Zhong; HAN, Lin-Hai; WANG, Dong-Ye. Strength and ductility of stiffened thin-walled hollow steel structural stub columns filled with concrete. *Thin-walled structures*, v. 46, n. 10, p. 1113-1128, 2008.
- [84] DING, Fa-xing et al. Mechanical behavior of circular and square concrete filled steel tube stub columns under local compression. *Thin-Walled Structures*, v. 94, p. 155-166, 2015.

- [85] SONG, Tian-Yi; XIANG, Kai. Performance of axially-loaded concrete-filled steel tubular circular columns using ultra-high strength concrete. In: Structures. Elsevier, 2020. p. 163-176.
- [86] HAN, Lin-Hai et al. Tests on curved concrete filled steel tubular members subjected to axial compression. Journal of Constructional Steel Research, v. 67, n. 6, p. 965-976, 2011.
- [87] YE, Yong et al. Concrete-filled bimetallic tubes under axial compression: Experimental investigation. Thin-Walled Structures, v. 108, p. 321-332, 2016.
- [88] DUNDU, M. Compressive strength of circular concrete filled steel tube columns. Thin-Walled Structures, v. 56, p. 62-70, 2012.
- [89] HASKETT, Matthew et al. Evaluating the shear-friction resistance across sliding planes in concrete. Engineering Structures, v. 33, n. 4, p. 1357-1364, 2011.
- [90] LIU, Jiepeng; ZHOU, Xuhong; GAN, Dan. Effect of friction on axially loaded stub circular tubed columns. Advances in Structural Engineering, v. 19, n. 3, p. 546-559, 2016.
- [91] ROEDER, Charles W.; CAMERON, Brad; BROWN, Colin B. Composite action in concrete filled tubes. Journal of structural engineering, v. 125, n. 5, p. 477-484, 1999.
- [92] HAN, Lin-Hai; YAO, Guo-Huang. Behaviour of concrete-filled hollow structural steel (HSS) columns with pre-load on the steel tubes. Journal of Constructional Steel Research, v. 59, n. 12, p. 1455-1475, 2003.
- [93] MUCIACCIA, Giovanni et al. Response of self-compacting concrete filled tubes under eccentric compression. Journal of Constructional Steel Research, v. 67, n. 5, p. 904-916, 2011.
- [94] TAO, Zhong et al. Bond behavior in concrete-filled steel tubes. Journal of Constructional Steel Research, v. 120, p. 81-93, 2016.
- [95] MANDER, John B.; PRIESTLEY, Michael JN; PARK, R. Theoretical stress-strain model for confined concrete. Journal of structural engineering, v. 114, n. 8, p. 1804-1826, 1988.