

## **Avaliação de Colunas Tubulares Mistas (aço inoxidável, aço carbono e concreto)**

**Pedro F. Rodrigues, Pedro C. G. da S. Vellasco<sup>2</sup>, Luciano R. O. de Lima<sup>2</sup>,  
André T. da Silva<sup>2</sup> e Monique C. Rodrigues<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>PGECIV - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil / UERJ / pedrofr92@hotmail.com

<sup>2</sup>Departamento de Estruturas e Fundações / UERJ / vellasco@eng.uerj.br, luciano@eng.uerj.br, tenchini@eng.uerj.br, moniquecordeirorodrigues@gmail.com

### **Resumo**

Este artigo busca estudar o comportamento estrutural de colunas mistas formadas por dois perfis tubulares concêntricos com concreto preenchido entre eles, na qual o tubo interno é de aço carbono, enquanto o tubo externo é de aço inoxidável. Este sistema estrutural, largamente utilizado em países asiáticos, combina as vantagens oferecidas pela coluna tipo CFDST (*Concrete Filled Double Skin Tubular*), com as oferecidas pelo aço inoxidável. Com sua utilização, a coluna ganha vantagens adicionais referentes a estética, resistência à corrosão e a durabilidade, combinando de forma otimizada os três tipos de materiais. Ensaio foram realizados com perfis tubulares circulares e os resultados experimentais foram comparados com os calculados pelo método de dimensionamento desenvolvido por 9 para este tipo de coluna. No Brasil ainda não existe uma norma específica para as colunas tipo CFDST e poucos estudos foram realizados, levando os projetistas a buscarem orientações em normas e estudos internacionais. Desta forma, o aprimoramento de pesquisas voltadas para este tipo de coluna torna-se fundamental para uma maior compreensão de seu comportamento. Além disso, pretende-se colaborar para a difundir o uso do aço inoxidável como material estrutural.

### **Palavras-chave**

Colunas tubulares mistas; Aço inoxidável; Perfis de parede dupla; Comportamento estrutural; Resistência à compressão.

### **Introdução**

Nos últimos anos, diversos estudos foram realizados para colunas tubulares preenchidas com concreto (CFST- *Concrete Filled Steel Tubular*) e posteriormente para colunas tubulares de parede dupla preenchidas com concreto (CFDST - *Concrete Filled Double Skin Tubular*). O segundo tubo, no interior da coluna, tem a função de colaborar para a resistência do elemento de forma equivalente com a armadura longitudinal no interior do concreto armado, dispensando assim seu uso e aumentando a produtividade e a velocidade da montagem.

As colunas preenchidas com concreto tem sua rigidez aumentada, pois o tubo de aço se encontra mais afastado do centroide da seção transversal, aumentando seu momento de inércia. Dispensam o uso de fôrmas e cimbramento, resultando em economia de material e mão-de-obra. O concreto no interior contribui para a formação de um núcleo ideal para suportar cargas de compressão, podendo retardar ou até mesmo impedir possíveis problemas de instabilidades locais do tubo de aço. Além disso, o concreto tem um acréscimo significativo de sua resistência devido ao confinamento lateral proporcionado pelo tubo.

A coluna CFST possui grande resistência, ductilidade e boa deformabilidade. Estas características também são notadas na coluna CFDST, além de sua aplicação estrutural levar a uma redução de peso próprio, devido a existência de uma seção vazada. A coluna CFDST também pode ser vantajosa em estruturas que precisam resistir a sismos, pois proporcionam uma redução da ação sísmica sobre a fundação.

Alguns estudos foram realizados por pesquisadores internacionais para entender melhor o comportamento de colunas curtas CFDST, tais como 9, 0 e 9. Recentemente, com a crescente utilização do aço inoxidável na construção civil, uma atenção maior voltada para as colunas CFDST com o tubo externo feito de aço inoxidável tem ocorrido, assim como vistos nos estudos de 9, 9 e 0.

### Dimensionamento

Diversos pesquisadores ao longo dos últimos anos vêm estudando uma forma de equacionar o dimensionamento das colunas CFDST, em especial as de aço inoxidável-concreto-aço carbono. Optou-se por seguir o dimensionamento proposto por 9, devido sua correta validação experimental. De acordo com 9 a capacidade resistente de colunas curtas mistas podem ser previstas como a capacidade da seção transversal CFDST equivalente. Nos cálculos considera-se que a capacidade total ( $N_{u,sm}$ ) da coluna de aço inoxidável-concreto-aço carbono é a soma da capacidade interior ( $N_{i,u}$ ) e uma capacidade ( $N_{osc,u}$ ) caracterizada pela contribuição do tubo de aço inoxidável exterior, juntamente com o concreto.

$$N_{u,sm} = N_{osc,u} + N_{i,u} \quad (1)$$

Onde:

$$N_{osc,u} = f_{osc} A_{soc} \quad (2)$$

$$N_{i,u} = A_{si} f_{syi} \quad (3)$$

$$A_{soc} = A_{so} + A_c \quad (4)$$

$A_{soc}$  é o somatório da área da seção transversal do tubo externo de aço inoxidável ( $A_{so}$ ) e do concreto ( $A_c$ );  $A_{si}$  é a área do tubo interno de aço carbono e  $f_{syi}$  é a tensão de escoamento do aço carbono. A resistência  $N_{osc,u}$  é obtida de forma semelhante a resistência de seções tubulares de aço totalmente preenchidas com concreto, considerando a área relevante da seção de concreto para as colunas de seção transversal DST. Para as seções circulares tem-se:

$$f_{osc} = C_1 \chi_{HAN}^2 f_{syo} + C_2 (1,14 + 1,02\xi) f_{ck} \quad (5)$$

Onde

$$C_1 = \frac{\alpha}{(1 + \alpha)} \quad (6)$$

$$C_2 = \frac{(1 + \alpha_n)}{(1 + \alpha)} \quad (7)$$

$$\alpha = \frac{A_{so}}{A_c} \quad (8)$$

$$\alpha_n = \frac{A_{so}}{A_{ce}} \quad (9)$$

$$\chi = \frac{d}{D - 2t_{so}} \quad (10)$$

Onde  $\chi$  é a razão de vazios das colunas; D e d são os diâmetros do tubo externo e interno respectivamente;  $t_{so}$  é a espessura da parede do tubo externo de aço inoxidável;  $A_{ce}$  é a área nominal da seção transversal do concreto.

$\xi$  é o fator de confinamento nominal de aço inoxidável, concreto e aço carbono dado por :

$$\xi = \frac{A_{so}f_{syo}}{A_{ce}f_{ck}} \quad (11)$$

Onde  $f_{syo}$  é a tensão de escoamento do aço inoxidável e  $f_{ck}$  é a resistência característica do concreto a compressão.

As áreas características das seções transversais das colunas CFDST de aço inoxidável-concreto-carbono com seção circular são dados por:

Área do concreto:

$$A_c = \frac{\pi(D - 2t_{so})^2}{4} - \frac{\pi d^2}{4} \quad (12)$$

Área nominal de concreto

$$A_{ce} = \frac{\pi(D - 2t_{so})^2}{4} \quad (13)$$

Área do tubo interno de aço carbono

$$A_{si} = \frac{\pi d^2}{4} - \frac{\pi(d - 2t_{si})^2}{4} \quad (14)$$

Área do tubo externo de aço inoxidável

$$A_{so} = \frac{\pi D^2}{4} - \frac{\pi(D - 2t_{so})^2}{4} \quad (15)$$

## Programa experimental

Duas colunas tubulares de seção circular e perfil duplo foram ensaiadas à compressão simples. As dimensões das colunas ensaiadas podem ser vistas na Tabela 1.

**Tabela 1 – Dimensões das colunas ensaiadas**

Colunas ID	Tubo externo D x t <sub>so</sub> [mm x mm]	Tubo interno d x t <sub>si</sub> [mm x mm]	$\chi$	Concreto $f_{ck}$ (MPa)	Altura (mm)
C 1 e C 2	168,28 x 2,77	88,90 x 5,50	0,546	30,1	550

O comprimento (L) das colunas ensaiadas foi definido como três vezes o diâmetro externo da seção. Segundo 9, essa relação minimiza os efeitos da flambagem global se comportando com uma coluna curta. Entretanto, decidiu-se arredondar o valor para 550 mm para uma melhor padronização e corte dos tubos. A razão de vazios ( $\chi$ ) das colunas foi definida pela equação 10.

Optou-se pela utilização da seção transversal circular por apresentar uma distribuição de tensões muito eficiente em relação ao seu centroide, uma vez que qualquer ponto de sua superfície está equidistante de seu eixo central. O comportamento do concreto confinado é equivalente ao do não confinado quando submetido a cargas de baixa intensidade. Porém as colunas mistas preenchidas devido sua maior resistência, geralmente estão submetidos a valores de forças muito mais elevadas. Verifica-se, então, que o valor da resistente é superior à soma dos valores das parcelas de resistência correspondentes aos tubos de aço e ao núcleo de concreto. Entretanto, segundo 9, apenas a seção circular apresenta esse acréscimo total de resistência devido ao estado triaxial de tensões.

Para evitar a ocorrência de flambagem local diretamente nas extremidades da coluna, como verificado nos ensaios de 0, optou-se pela fabricação de anéis para enrijecer as regiões durante os ensaios. Dois anéis fabricados de aço carbono foram posicionados em ambas as extremidades com espessura de 7 mm e um comprimento de 50 mm. Seu diâmetro foi ajustado até se encaixar perfeitamente com o diâmetro externo das colunas (Figura 1).



**Figura 1 – Anel utilizado nos ensaios**

Foram soldados pequenos pedaços de barras entre os tubos internos e externos para evitar possíveis excentricidades entre os tubos no momento da concretagem e garantir que ambos estivessem concêntricos no momento do ensaio. A Figura 2 mostra a coluna com as barras soldadas antes da concretagem.



**Figura 2 – Seções transversais e protótipos – antes e depois da concretagem**

### Propriedade dos materiais

Foram utilizados o aço inoxidável austenítico do tipo 304L e o aço carbono para os tubos externos e internos, respectivamente. Ensaio de tração foram realizados com o intuito de obter as propriedades do aço inoxidável e carbono. A Tabela 2 lista a tensão de escoamento ( $f_y$ ), a tensão máxima atingida antes da ruptura ( $f_u$ ) e a deformação ( $\Delta L$ ) encontrados.

**Tabela 2 – Propriedade do aço inoxidável e aço carbono utilizados**

Tipo	Dimensões D x t [mm x mm]	$f_y$ (MPa)	$f_u$ (MPa)	$\Delta L$ (%)
Aço inoxidável	168,28 x 2,77	419,00	674,18	59,18
Aço carbono	88,90 x 5,50	375,00	474,00	34,00

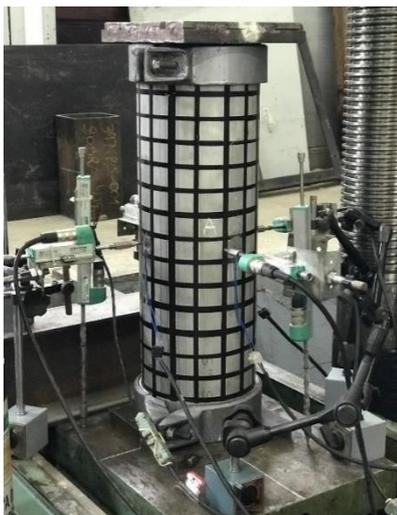
O traço do concreto foi calculado para se obter uma resistência característica aos 28 dias de 25 MPa através do método de dosagem 0 sendo uma adaptação do método da 0, para agregados brasileiros. Devido a pequena seção a ser preenchida entre os tubos, foi utilizado brita zero e super-plastificante para tornar o concreto mais fluido e melhorar a trabalhabilidade durante a concretagem. O super-plastificante teve sua adição definida como 0,5% da massa do cimento. A caracterização dos agregados também foi realizada para definir sua granulometria, módulo de finura e teor de umidade. Desta forma, pode-se chegar ao seguinte traço para 1 m<sup>3</sup> com os valores de umidade dos agregados já corrigidos: Cimento: 434 kg; Areia: 994 kg; Brita zero: 684 kg; Água: 185 kg. O módulo de elasticidade do concreto encontrado através de ensaio seguindo a 9 foi de 25,89 GPa e a sua resistência no dia dos ensaios 30,1 MPa.

### Instrumentação e montagem dos ensaios

A instrumentação utilizada nos ensaios teve como objetivo medir os deslocamentos sofridos pelas colunas. Para isso, foram utilizados transdutores de deslocamentos, LVDT (*Linear Variable Differential Transducer*). Foram posicionados dois LVDTs para fazer a

leitura do deslocamento axial na direção do carregamento, e quatro nos quadrantes da seção transversal à meia altura da coluna.

Para evitar possíveis danos na máquina de compressão e distribuir de forma homogênea a carga aplicada na coluna, placas metálicas foram posicionadas nas extremidades. O ensaio completamente montado pode ser visto na Figura 3. Todos os ensaios foram realizados com acréscimo de carga na prensa hidráulica com controle de deslocamento.



**Figura 3 – Coluna mista montada para o ensaio**

### **Análise dos resultados**

Após a realização dos ensaios, percebeu-se que ambas as colunas se comportaram de maneira bastante dúctil. As Figuras 4 e 5 apresentam a configuração deformada das colunas C1 e C2 após os ensaios, respectivamente. A Figura 6 ilustra o gráfico comparativo da carga vertical versus deslocamento axial médio das colunas. A carga vertical foi aproximadamente proporcional ao deslocamento axial durante o estágio inicial de carregamento.



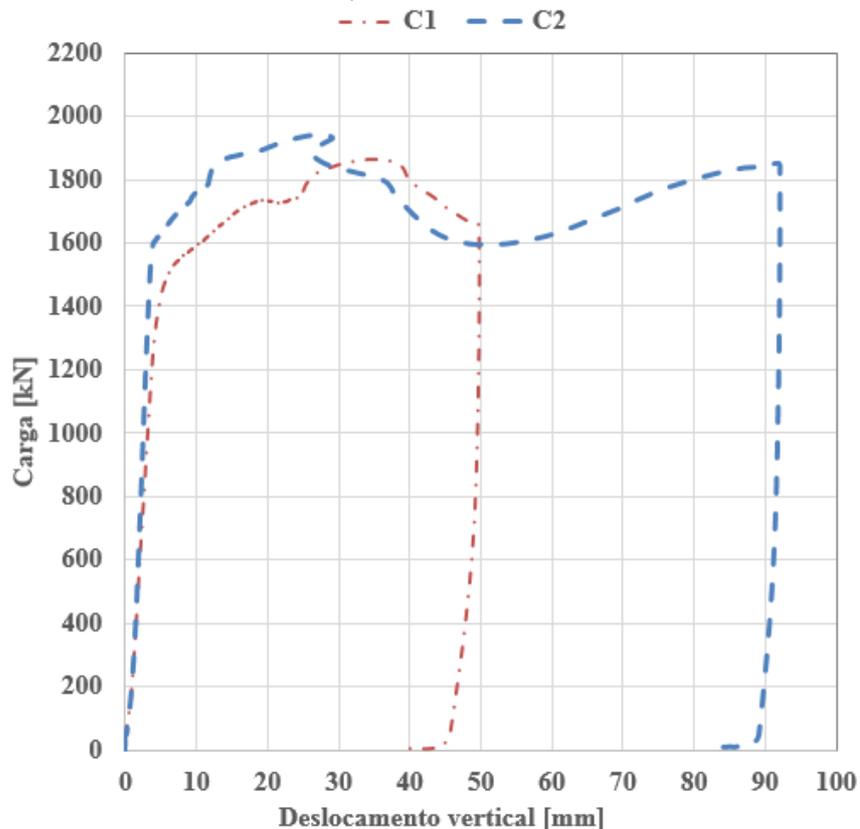
**Figura 4 – Modos de falhas da coluna C1**

A coluna C1 atingiu sua carga máxima em 1865,38 kN. A carga vertical se mostrou relativamente proporcional ao deslocamento axial até atingir o valor de aproximadamente 1500 kN quando começou a perder rigidez. Quando a carga atinge cerca de 1730 kN ocorre a primeira deformação caracterizada pela flambagem circunferencial próximo a extremidade superior. A leitura dos dados mostra uma queda de carga à medida que esta deformação começa a se desenvolver. O deslocamento axial aumenta cerca de 4 mm até que ocorre a acomodação da coluna e a mesma volta a resistir ao carregamento e recupera sua rigidez. Novamente uma nova deformação circunferencial surge em 1825 kN mas desta vez a meia altura da coluna. A medida que a carga aumenta uma nova deformação ocorre na região inferior em 1860 kN enquanto a deformação localizada a meia altura continua aumentando. Um pouco antes da coluna atingir a carga máxima uma segunda deformação circunferencial ocorre próxima à meia altura e finalmente a coluna atinge seu colapso recorrente da flambagem local à meia altura.



**Figura 5 – Modos de falhas da coluna C2**

A coluna C2 atingiu sua carga máxima em 1941,07 kN. Novamente a relação da carga vertical e deslocamento axial se mostrou proporcional, entretanto, a perda de rigidez ocorreu um pouco depois em aproximadamente 1600 kN. O mesmo tipo de flambagem local circunferencial foi notado nesta coluna. Desta vez, ao atingir cerca de 1780 kN a primeira deformação começou a ocorrer na extremidade superior, seguida de uma nova deformação localizada a meia altura da coluna e outra na região inferior cerca de 1850 e 1900 kN, respectivamente. A medida que a carga continuou aumentando, percebeu-se a deformação localizada a meia altura se desenvolvendo de forma mais acentuada até atingir seu colapso novamente atribuído a deformação à meia altura. Entretanto, decidiu-se prolongar o ensaio e à medida que o concreto foi se acomodando, novas deformações circunferenciais apareceram partindo da meia altura e subindo para o topo da coluna. A coluna conseguiu retomar um pouco de sua resistência mas não superando a carga de pico. A partir deste momento decidiu-se encerrar o ensaio tendo em vista que a coluna mista não absorvia cargas superiores a do ciclo anterior e a sua configuração deformada já estava em um estágio bastante avançado.



**Figura 6 – Gráfico carga vertical x deslocamento axial das colunas**

Após a finalização dos ensaios, a resistência das colunas foi calculada seguindo a formulação proposta por 9 com as propriedades dos materiais adquiridas nos ensaios de caracterização. A tabela 3 apresenta os resultados obtidos experimentalmente e os calculados.

**Tabela 3 – Comparação da resistência das colunas teóricas e experimentais**

Coluna	$N_{ue}$ (experimental)	$N_{u,sm}$ 9	$N_{u,sm}/N_{ue}$
C1	1865,38 kN	1735,48 kN	0,930
C2	1941,07 kN	1735,48 kN	0,894

Os valores teóricos encontrados se mostraram bastante próximos dos obtidos nos ensaios, com uma variação de 7 e 11% aproximadamente. A formulação proposta por 9 mostrou-se a favor da segurança, visto que os resultados encontrados foram menores que os experimentais.

### Conclusões

- As colunas testadas comportaram-se de maneira bastante dúctil. Os modos de falha típicos destas colunas CFDST foram flambagem local para fora dos tubos;
- As colunas tiveram seus colapsos devido à flambagem em torno da meia altura;

- O modelo teórico utilizado mostrou-se bastante preciso para a previsão da resistência das colunas CFDST.

## Referências

- TAO Zhong, HAN Hai Lin. Behavior of concrete-filled double skin rectangular steel tubular beam-columns, *Journal of Constructional Steel Research*. v 62, p 631-646, 2006.
- TAO Zhong, HAN Hai Lin, WANG ZB. Experimental behaviour of stiffened concrete filled thin-walled hollow steel structural (HSS) stub columns. *Journal of Constructional Steel Research* 2005;61(7):962–83.
- HAN L. H.; REN Q. X.; e LI W. Tests on Inclined, Tapered and STS Concrete-Filled Steel Tubular (CFST) Stub Columns. *Journal of Constructional Steel Research*; 66 (10): 1186–1195, 2010.
- HAN, L.-H.; REN, Q. -X.; LI, W. Tests on stub stainless steel-concrete-carbon steel double-skin tubular (DST) columns. *Journal of Constructional Steel Research*, v. 67, i. 3, p. 437-452, Mar. 2011.
- HASSANEIN, M. F.; KHAROOB, O. F.; e LIANG, Q. Q. Circular Concrete-Filled Double Skin Tubular Short Columns with External Stainless Steel Tubes under Axial Compression. *Thin-Walled Structures*, v. 73, p. 252-263, Sep. 2013.
- SILVA, Glauco Bezerra. Comportamento Estrutural de Perfis Tubulares Mistos – Aço Inoxidável, Concreto, Aço Carbono. Dissertação de Mestrado. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. 2013.
- SHANMUGAM, N. E.; LAKSHMI, B. State of the art report on steel-concrete composite columns. *Journal of Constructional Steel Research*. v. 57, n. 10, p.1041-1080. Oct., 2001.
- RODRIGUES, P. P. F. Parâmetros de dosagem do concreto ET - 67. São Paulo: ABCP, 1990.
- ACI 211.1-81: Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight and mass concrete: ACI manual of concrete practice. Detroit, Michigan, 1985. (revised 1988). Part 1: materials and general properties of concrete.
- ABNT NBR 8522, Concreto – Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Associação Brasileira de Normas Técnicas - Rio de Janeiro, Brasil, 2008.