Revista Tecnológica - Universidade Estadual de Maringá - ISSN 1517-8048
DOI: 10.4025/revtecnol.v33i1.73045

INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL DA RESPOSTA DINÂMICA DE VIGAS CAIXÃO DE AÇO-CONCRETO PARA DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE FABRICAÇÃO

EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON THE DYNAMIC RESPONSE OF STEEL-CONCRETE BOX BEAMS FOR DIFFERENT FABRICATION PROCESS

Max de Castro Magalhães [1]
Rodrigo Barreto Caldas [1]

Resumo: Esse trabalho apresenta e compara resultados obtidos através de análise experimental e método analítico acerca da resposta dinâmica (frequências naturais) de vigas caixão de aço retangulares de aço preenchidas com concreto com diferentes configurações de fabricação. Seis diferentes configurações de vigas mistas foram estudadas: viga tubular de aço sem preenchimento de concreto; viga tubular de aço preenchida com concreto; viga tubular de aço preenchida com concreto com tratamento da superfície de contato aço-concreto para minimizar o atrito; vigas tubular de aço preenchida com concreto com barras de armadura em uma e duas camadas no lado tracionado; e, viga tubular de aço preenchida com concreto e com laje colaborante sobreposta. Os resultados, em termos da 'função de resposta em frequência'(FRF), mostraram uma boa correlação entre as frequências fundamentais obtidas por meio dos procedimentos experimental e analítico para uma das configurações estudadas. Foi demonstrado também que há uma diferença mais significativa na resposta dinâmica da viga tubular sem preenchimento de concreto em comparação às outras configurações, conforme previsto. As variações de configuração das demais vigas geraram pouca influência sobre suas respostas dinâmicas.

Palavras-chaves: Resposta dinâmica, vigas caixão, análise experimental, fabricação.

Abstract: *This study aims to compare results obtained via experimental tests and analytical method for the dynamic response (natural frequencies) of a steel hollow section beam for different concrete-filled configurations. Six different configurations are considered herein: steel hollow section beam with no concrete-filled; steel concrete-filled hollow beam with release agent applied on the interface steel-concrete; steel concrete-filled hollow beam without release agent applied on the interface steel-concrete; concrete-filled hollow beam with one rebar layer on the bottom side; concrete-filled hollow beam with two rebar layers on the bottom side; concrete-filled hollow beam with connected concrete slab. The results were presented in terms of the parameter named Frequency Response Function (FRF). It was seen that the results obtained via experimental tests and analytical formulation showed a good correlation between them. The results for the hollow steel-box beams with no concrete filled showed a significant different dynamic response in comparison with the other types of beams, as expected. All concrete filled beams presented similar results in terms of their dynamic responses.*
Keywords: Dynamic response; Steel-box beam; Experimental analysis; Fabrication.

[1]*Universidade Federal de Minas Gerais, Campus Pampulha – Brasil, email: maxdcm.professor@gmail.com; rbcaldas@gmail.com*

Revista Tecnológica - Universidade Estadual de Maringá - ISSN 1517-8048
DOI: 10.4025/revtecnol.v27i1.34002

1 Introdução

Vigas com perfis de aço de seção tubular retangular são frequentemente empregadas em estruturas de pisos e coberturas, principalmente em decorrência de vantagens estéticas se comparadas aos perfis de aço de seção aberta (Han, L.H. and Bjorhovde, R., 2014; Ewins, D. J., 2000).

Quando o perfil metálico de seção fechada é preenchido com concreto, tornando-se uma viga mista, somam-se aos benefícios estéticos, vantagens estruturais e construtivas. Para uma viga mista de perfil tubular de aço preenchido com concreto, sem ou com armaduras (J. M. Flor *et al*., 2017), uma série de vantagens podem lhe ser conferidas, tais como: aumento da carga crítica do perfil, considerando a flambagem local e global, aumento da resistência, da rigidez e da ductilidade da viga mista devido ao confinamento do núcleo de concreto pelo tubo de aço. Com um núcleo de concreto devidamente armado, a viga terá ainda uma maior resistência ao fogo, em casos de incêndio. Com relação às vantagens construtivas do sistema misto, pode-se destacar que neste sistema o escoramento e fôrmas para modelagem do concreto são dispensáveis. Consequentemente, há uma diminuição no custo de material e da mão-de-obra, além da otimização do cronograma (Moon, J. *et al*. 2012).

Vários estudos foram publicados sobre o comportamento estrutural dos elementos em perfil tubular preenchido com concreto, bem como pesquisas voltadas para os aspectos construtivos, descrevendo programas experimentais, estudos numéricos e analíticos com foco predominante no comportamento de pilares mistos tubulares de aço preenchidos com concreto submetidos à compressão axial (Flor *et al.*, 2015; Malite M. 1993; Murray *et al.* 2003; Papageogiou, A.V. e C.J. Gantes, 2008; Pavic, A. e Reynolds, P. 2003; Smith et al., 2009; Wang Y. H. et al., 2016; Lu Y. Q. e Kenneth, J. L., 1994; Zhan Y. *et al*., 2016).

Flor *et al.* (2015) desenvolveu um estudo experimental, numérico e analítico sobre o comportamento à flexão simples de vigas mistas constituídas de perfis de aço tubular retangular, em escala real, preenchido com concreto, armado ou não, autoadensável, com resistência entre 20 e 50 MPa (Classe I), com ou sem a contribuição de uma laje de concreto sobreposta, concretadas na posição horizontal, visando à sua aplicação in loco como vigas de piso em edificações. Flor *et al.* (2017) destacaram que as pesquisas realizadas sobre vigas mistas de aço preenchidas com concreto e perfil tubular são limitadas. Diferentemente do trabalho da autora e deste presente, os trabalhos já realizados não contemplam modelos de vigas com tamanho superior a 2 metros, não continham armadura no interior do núcleo de

Revista Tecnológica - Universidade Estadual de Maringá - ISSN 1517-8048
DOI: 10.4025/revtecnol.v27i1.34002

concreto nem laje sobreposta e o preenchimento dos tubos com concreto foi feito na posição vertical.

Vários modelos analíticos para análise dinâmica de estruturas de pisos vêm sendo desenvolvidos em diversos países, desde o primeiro trabalho apresentado por Murray *et al*. (2003), permitindo avaliar o conforto dos usuários e funcionamento de equipamentos sensíveis. Esses modelos em geral requerem o cálculo da primeira frequência natural e da aceleração, que são comparados aos limites de tolerância para verificar se a estrutura atende aos estados limites de serviço.

Para cada modo, a frequência fundamental (em Hertz) pode ser estimada usando a Equação (1) seguinte (Smith *et al*., 2009; Wang Y. H. *et al*., 2016; Lu Y. Q. e Kenneth, J. L., 1994; Zhan Y. *et al*., 2016):

$$\boldsymbol{f_n} = \boldsymbol{K}\left(\frac{gE_sI_t}{wL^4}\right)^{\frac{1}{2}} \qquad (1)$$

onde $\boldsymbol{K}$ é um parâmetro constante (igual a 1,57 vigas simplesmente apoiadas e 0,56 para vigas em balanço), E_s é o módulo de elasticidade do concreto, I_t é o momento de inércia transformado em caso de vigas compostas, L é o vão da viga, g é a aceleração da gravidade e w é o peso da viga por unidade de comprimento (inclui o peso próprio e cargas acidentais).

Em suma, este trabalho apresenta resultados experimentais acerca das frequências naturais obtidas da resposta dinâmica de protótipos de vigas tubulares retangulares de aço preenchidas com concreto e diferentes configurações construtivas: viga tubular de aço sem preenchimento de concreto; viga tubular de aço preenchida com concreto; viga tubular de aço preenchida com concreto com tratamento da superfície de contato aço-concreto para minimizar o atrito; viga tubular de aço preenchida com concreto com barras de armadura em uma e duas camadas no lado tracionado; e, viga tubular de aço preenchida com concreto e com laje colaborante sobreposta. Os tubos foram preenchidos na posição horizontal com concreto autoadensável, como vigas mistas de piso em obras de edificações em estruturas tubulares. O intuito é verificar a influência das diferentes configurações na resposta dinâmica das vigas, o que pode sugerir como trabalhos futuros, a adequação do modelo analítico para cálculo das frequências fundamentais segundo as prescrições do Design Guide (2011) e da ABNT-NBR 8800 (2021).

Revista Tecnológica - Universidade Estadual de Maringá - ISSN 1517-8048
DOI: 10.4025/revtecnol.v27i1.34002

Dessa forma o trabalho pode contribuir para o avanço das pesquisas sobre o assunto e, particularmente, contribuir para o preenchimento da lacuna atualmente existente na Norma Brasileira no que tange o emprego de vigas.

2 Materiais e Métodos

Dois protótipos foram testados para cada configuração, com exceção para a configuração S5 (viga caixão preenchida com concreto e laje maciça de concreto sobreposta). As seis configurações consideradas apresentadas na Figura 1 abaixo são: viga caixão sem preenchimento de concreto; viga caixão preenchida com concreto e aplicação de desmoldante na superfície interna da viga de aço; viga preenchida com concreto e uma camada de vergalhões na parte inferior da seção transversal; viga preenchida com concreto e duas camadas de vergalhões na sua parte inferior; viga caixão preenchida com concreto e laje maciça de concreto sobreposta.

O concreto considerado foi do tipo autoadensável classe C-30, fabricado em uma central de concreto. O desmoldante foi aplicado nas superfícies internas da viga de aço tipo caixão, de forma a se evitar atrito devido contato aço-concreto. O nível médio de vibração da viga foi medido a partir da excitação por uma força impulsiva. A fonte de vibração foi um martelo instrumentado de cabeça de plástico (IEPE – 5803A da classe de 5000 lbf, 1mV/lbf com cabeça de 12 lb). Ele foi usado para excitar a viga em locais diferentes durante um período de medição de 5 segundos.

a) S0 - Viga caixão de aço sem preenchimento de concreto

b) S1 - Tubo de aço preenchido com concreto e aplicação de desmoldante na superfície interna da viga caixão

Revista Tecnológica - Universidade Estadual de Maringá - ISSN 1517-8048
DOI: 10.4025/revtecnol.v27i1.34002

c) S2 - Viga caixão preenchida com concreto sem aplicação de desmoldante na interface interna concreto-aço

d) S3 - Tubo de aço preenchido com concreto armado com duas barras de 16 mm de diâmetro em uma camada.

e) S4 - Tubo de aço preenchido com concreto armado com quatro barras de 16 mm de diâmetro dispostas em duas camadas

f) S5 - Tubo de aço preenchido com concreto com quatro barras de 16 mm de diâmetro dispostas em duas camadas e laje maciça de concreto sobreposta

Figura 1. Protótipos: especificação das diferentes vigas mistas ensaiadas [3,5]

Fonte: Próprios autores (2024)

Em geral, as frequências de ressonância são sensíveis às condições de contorno, propriedades elásticas do apoio da viga, tipo de articulação e contato entre o aço e o concreto. Os valores de mobilidade foram medidos para as cinco configurações diferentes (com e sem desmoldante, com e sem armadura e viga de aço isolada sem concreto). As respostas

Revista Tecnológica - Universidade Estadual de Maringá - ISSN 1517-8048
DOI: 10.4025/revtecnol.v27i1.34002

dinâmicas são apresentadas para uma faixa de frequência 0-700 Hz utilizando-se ensaio dinâmico (Figura 2 abaixo) e o método “Função Indicadora de Modos” – FIM (Pavic, A.; Reynolds, P., 2003).

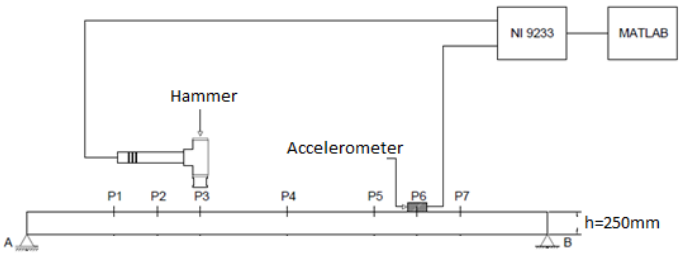

Figura 2. Configuração dos aparatos usados para teste dinâmico em viga mista. Vão da viga igual a 5.700 mm. Posições dos pontos na viga: A(0 mm); P_1(950mm); P_2(1.425mm); P_3(1.900 mm); P_4(2.850 mm); P_5(3.800 mm); P_6(4.275 mm); P_7(4.750 mm); B(5.700 mm).

Fonte: Próprios autores (2024)

Os resultados analíticos para as frequências naturais foram obtidos a partir da Equação (1). Os cálculos analíticos foram executados somente para a viga S2 (Tabela 7) para efeito de comparação. A associação de um valor de frequência natural com seu respectivo modo de vibração foi estabelecida a partir da observação da parte imaginária das FRFs (Pavic, A.; Reynolds, P., 2003).

3 Resultados e discussões

Primeiramente, foram obtidos os resultados para V1 e V2 das vigas S0, S1, S2, S3 e S4. A viga S5 teve apenas um protótipo ensaiado. Em seguida, foram comparados os valores de frequências naturais obtidos a partir de curvas FRF das vigas mistas com diferentes configurações de fabricação. São comparadas as vigas S0 (sem preenchimento de concreto) e S2 (preenchida com concreto); S1 (preenchida com concreto e com minimização do atrito) e S2; S2 e S3 (preenchida com concreto e armadura tracionada em uma camada); S3 e S4 (preenchida com concreto e armadura tracionada em duas camadas); S4 e S5 (preenchida com concreto, armadura interna tracionada em duas camadas e laje colaborante). Os resultados analíticos para as frequências naturais foram obtidos a partir da Equação (1). Os cálculos foram feitos para as vigas S0, S1, S2, S3, S4 e S5. Tabelas comparativas são apresentadas para os resultados experimental e analítico das vigas S0, S1, S2, S3, S4 e S5. A associação de um valor de frequência natural com seu respectivo modo de vibração foi estabelecida a partir

Revista Tecnológica - Universidade Estadual de Maringá - ISSN 1517-8048
DOI: 10.4025/revtecnol.v27i1.34002

da observação da parte imaginária das FRFs. As 'Funções de Resposta em Frequência' foram obtidas na faixa 0- 700Hz e expressas pela razão entre velocidade e força (Mobilidade).

Utilizou-se medições que tiveram em comum a mesma posição dos acelerômetros. A Tabela 1 realça os valores das primeiras frequências naturais de 0 a 700Hz (obtidos no teste de impacto) e as diferenças em porcentagem entre os protótipos S2V1 e S2V2. Para auxiliar na determinação de um pico correspondente a uma frequência natural, foram utilizadas também as curvas de coerência e fase. Mínimos na curva de coerência (ou seja, picos mais próximos de zero), podem corresponder a uma ressonância. Além disso, numa frequência onde há defasagem na curva de fase também corresponde a uma frequência ressonante na curva de mobilidade.

Tabela 1. Comparação em porcentagem das diferenças de frequências naturais para as vigas S2V1 e S2V2.

Frequência Natural (Hz)	S2V1	S2V2	Diferença (%)
fn1	13,67	13,33	2,55
fn2	37,17	37,17	0,0
fn3	66,83	61,83	8,09
fn4	102,5	99,67	2,84

Nota-se que, apesar de existirem diferenças entre os protótipos com a mesma concepção, essas diferenças são mínimas, o que permite ao estudo considerar para outras comparações apenas um protótipo de cada tipo de viga. Assim, este trabalho se restringirá à análise apenas de um dos protótipos de cada modelo de viga. As curvas real e imaginária podem também revelar as frequências naturais da viga: a curva da parte real cruza o eixo das frequências onde há uma ressonância, ou seja, onde há uma frequência natural. Nesse mesmo ponto, a parte imaginária apresenta um mínimo. A comparação se dará, nesta seção, entre protótipos diferentes. Apenas um protótipo (V1 ou V2) será usado. Entretanto, em alguns casos em que alguma frequência aparece apenas no protótipo não escolhido e, aparentemente, é característica do modelo em questão, ela será inserida entre as frequências aqui demonstradas. A Tabela 2 apresenta as quatro primeiras frequências naturais das vigas S0 (sem preenchimento de concreto) e S2 (com preenchimento de concreto), a razão e a diferença em porcentagem entre as duas vigas. Para montagem da tabela, foram usados os valores de frequências naturais do protótipo V2 da viga S0, já que só para esse protótipo foi usada a FIM. Para a viga S2, foram escolhidos os valores das frequências naturais do protótipo V1.

Revista Tecnológica - Universidade Estadual de Maringá - ISSN 1517-8048
DOI: 10.4025/revtecnol.v27i1.34002

Tabela 2. Tabela comparativa entre as quatro primeiras frequências naturais das vigas S0 e S2

Freq. (Hz)	S0	S2	Diferença (%) (ref. menor)	Razão (menor/maior)
fn1	19,2	13,67	40,45	0,71
fn2	53,2	37,17	43,13	0,70
fn3	82,8	66,83	23,90	0,81
fn4	127,2	102,5	24,10	0,81

Para representar as quatro primeiras frequências naturais da viga S1 (com preenchimento de concreto e com desmoldante), foi escolhido o protótipo V1, já que para este protótipo foi possível plotar curvas utilizando FIM de pontos diferentes do acelerômetro na viga. A comparação entre a viga S0 (sem preenchimento de concreto) e S2 (com preenchimento de concreto) revela diferenças consideráveis entre elas, demonstrando que a presença ou não do concreto interfere consideravelmente na dinâmica da viga. A viga S0 (sem preenchimento de concreto) apresenta valores superiores aos valores de frequência da viga S2 (preenchida com concreto). Um paralelo entre as vigas S1 (preenchida com concreto e com desmoldante) e S2 (preenchida com concreto e sem desmoldante) na Tabela 3 apresenta diferenças sutis entre os valores de suas frequências naturais, considerando que diferenças de aproximadamente 3%, por exemplo, para a primeira frequência natural, foi demonstrada pelas curvas FRF dos protótipos semelhantes V1 e V2 de ambos os modelos. Aparentemente, portanto, a presença do desmoldante causa pouca influência sobre a dinâmica da viga.

Tabela 3. Tabela comparativa entre as quatro primeiras frequências naturais das vigas S1 e S2

Freq. Natural (Hz)	S1	S2	Diferença (%)	(menor/maior)
Fn1	14,5	13,7	6,1	0,94
Fn2	38,7	37,2	4,0	0,96
Fn3	58,8	66,8	13,6	0,88
Fn4	97,8	102,5	4,8	0,95

Na Tabela 4, pode-se observar que as vigas S2 e S3 apresentam diferenças consideráveis entre seus valores de frequências ressonantes, o que, segundo os resultados experimentais, demonstra que a presença da armadura de aço tracionada em uma camada pode gerar efeitos sobre as propriedades dinâmicas da viga

Revista Tecnológica - Universidade Estadual de Maringá - ISSN 1517-8048
DOI: 10.4025/revtecnol.v27i1.34002

Tabela 4. Tabela comparativa entre as quatro primeiras frequências naturais das vigas S2 e S3

Freq. Natural (Hz)	S3	S2	Diferença (%)	(menor/maior)
Fn1	15,2	13,7	10,97	0,90
Fn2	43,8	37,2	17,92	0,85
Fn3	59,7	66,8	12,0	0,89
Fn4	70,7	102,5	45,04	0,69

A Tabela 5 representa as primeiras frequências naturais das vigas S3 (com armadura tracionada em uma camada) e S4 (com armadura tracionada em duas camadas). Ao que revela os valores de frequência fundamental das duas vigas, tração em uma ou duas camadas da armadura interna, interfere pouco na dinâmica da viga e a diferença existente (frequência de S4 maior) pode ser relacionada ao valor do momento de inércia.

Tabela 5. Tabela comparativa entre as quatro primeiras frequências naturais das vigas S3 e S4

Freq. Natural (Hz)	S3	S4	Diferença (%)	(menor/maior)
Fn1	15,2	15,4	1,52	0,99
Fn2	43,8	50,2	14,83	0,57
Fn3	59,7	83,8	39,1	0,72
Fn4	70,7	115,6	63,58	0,61

A Tabela 6 relaciona os valores das primeiras frequências naturais das vigas S4 (sem laje colaborante) e S5 (com laje colaborante). As diferenças são mais significativas a partir da segunda frequência natural. A frequência fundamental das duas vigas é bastante próxima, sendo possível dizer que, segundo os resultados experimentais, para a frequência fundamental, a presença de laje colaborante não interfere na dinâmica da viga. Já a Tabela 7 apresenta uma comparação dos resultados experimental e analítico (usando a Equação (1)) para a viga S2. Pode-se observar que a fórmula analítica apresenta um melhor resultado para a frequência fundamental da viga. Para os modos de vibração superiores o resultado vai se deteriorando.

Tabela 6. Tabela comparativa entre as quatro primeiras frequências naturais das vigas S4 e S5

Freq. Natural (Hz)	S4	S5	Diferença (%)	(menor/maior)
Fn1	15,4	15,3	0.46	1
Fn2	50,2	34	47,7	0,68
Fn3	83,0	110,8	33,5	0,75
Fn4	115,6	191	65,2	0,61

Revista Tecnológica - Universidade Estadual de Maringá - ISSN 1517-8048
DOI: 10.4025/revtecnol.v27i1.34002

Tabela 7. Comparação dos resultados experimental e analítico (usando a Equação (1)) para a viga S2.

Freq. Natural (Hz)	Analítico (Eq.01)	Experimental (Hz)	Diferença (%)	(menor/maior)
Fn1	13,74	13,67	4,35	0,99
Fn2	54,97	37,17	40,92	0,68
Fn3	123,68	66,83	76,53	0,64
Fn4	209,87	102,5	104,41	0,47

4 Conclusões

O método de "função indicadora de modos" (FIM) utilizado pode reduzir as chances de não se identificar alguma frequência natural da viga ensaiada. A presença de armadura de aço tracionada em uma camada, tal como se constitui a viga S3, gera efeitos na resposta dinâmica da viga, ainda que não muito proeminentes. A reposta dinâmica das vigas não é sensível à diferença da armadura tracionada em uma ou duas camadas. Um paralelo entre os resultados analítico e experimental demonstrou que a Equação (1) utilizada para os cálculos analíticos é bastante eficiente para se estimar o valor da frequência corresponde ao primeiro modo de vibração das vigas, mas não é uma boa alternativa para se obter os demais valores de frequências naturais.

Agradecimentos

Gostaríamos de agradecer à nossa ex-aluna, Dâmia Carina Dias do Carmo, na época, aluna do Programa de Pós-Graduação em Estruturas, pelos ensaios experimentais realizados.

Referências

ABNT - **NBR 8800 – Projeto de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edifícios.** 2021

Design Guide, American Institute of Steel Construction (AISC), 2011

EWINS, D. J., **Modal Testing: Theory, Practice and Application**, 2. Ed. Baldock: Research Studies Press, 2000.

HAN, L.H.; BJORHOVDE, R. Developments and advanced applications of concrete-filled tubular (CFST) structures: members. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 100, p. 211-228, 2014.

J. M. FLOR *et al.* Experimental study on the flexural behavior of large-scale rectangular concrete-filled steel tubular beams," **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, vol. 10, no. 4, pp. 895-905, August, 2017.

J. M. FLOR *et al.* Modelagem Numérica de Vigas Mistas Tubulares de Aço Preenchidas com Concreto. XXXVI Iberian Latin-American **Congress on Computational Methods in Engineering***,* Rio de Janeiro*,*2015.

M. MALITE **Análise do Comportamento Estrutural de Vigas Mistas Aço-Concreto Constituídas por Perfis de Chapas Dobradas**, Ph.D. thesis, Abbrev. Dept., Univ. of São

Revista Tecnológica - Universidade Estadual de Maringá - ISSN 1517-8048
DOI: 10.4025/revtecnol.v27i1.34002

Paulo, City of São Paulo, S.P., 1993.

MOON, J.; ROEDER, C.W.; LEHMAN, D.E.; LEE, H.E. Analytical modeling of bending of circular concrete-filled steel tubes. **Engineering Structures**, v. 42, p. 349-361, 2012

MURRAY, T.M.; ALLEN, D.E.; UNGAR, E.E. Floor Vibrations Due to Human Activity. **Eurosteel**, v.11, American Institute of Steel Construction, 2003.

PAPAGEOGIOU, A.V.; GANTES, C.J. Equivalent Uniform Damping Ratios for Irregular in Height Concrete/ Steel Structural Systems. **Eurosteel**, pp. 1485-1490, 2008.

PAVIC, A.; REYNOLDS, P. Modal testing and dynamic FE model correlation and updating of a prototype high-strength concrete floor. **Cement and Concrete Composites**, vol. 25, n. 7, p.787-799, 2003.

SMITH, A. L.; HICKS, S. J.; DEVINE, P. J. **Design of Floor for Vibration: A New Approach,** Ascot: The Steel Construction Institute, 2009.

Software TQS Docs 2023 www.tqs.com.br

WANG, Y. H. et al. Experimental Study on Torsion Behavior of Concrete Filled Steel Tube Columns subjected to Eccentric Compression. **Journal of Constructional Steel Research**, vol 129, no. 5, pp. 119-128, 2016.

Y. Q. LU; D. J. L. KENNEDY The flexural behaviour of concrete-filled hollow structural sections. **Canadian Journal of Civil Engineering**, vol. 21, no. 4, pp. 111-130, 1994

ZHAN, Y. et al. Behavior of prestressed concrete-filled steel tube (CFST) beam. **Engineering Structures**, vol. 122, no. 4, pp. 144-155, 2016.