

XXV
**CONGRESSO DE
CONSTRUÇÃO
METÁLICA MISTA**

**CONGRESSO DE
ENGENHARIA
DE FACHADAS**

**TEMAS ESPECIAIS
INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL
ENERGIA**

Editores
Luís Simões da Silva
Paulo Vila Real
Filip Ljubinković
Jorge Conde
Rohola Rahnavard
Luís Figueiredo Silva



Atas do XV Congresso de Construção Metálica e Mista e I Congresso de Engenharia de Fachadas

20 e 21 de Novembro de 2025

Luís Simões da Silva

Departamento de Engenharia Civil
Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra
Coimbra, Portugal

Paulo Vila Real

Departamento de Engenharia Civil
Universidade de Aveiro
Aveiro, Portugal

Filip Ljubinković

Departamento de Engenharia Civil
Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra
Coimbra, Portugal

Jorge Conde

Departamento de Estructuras de Edificación
Universidad Politécnica de Madrid
Madrid, Espanha

Rohola Rahnavard

Departamento de Engenharia Civil
Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra
Coimbra, Portugal

Luís Figueiredo Silva

Associação Portuguesa de Construção Metálica e Mista
Coimbra, Portugal

organização: **CMM** – Associação Portuguesa de Construção Metálica e Mista
EdF – Associação Portuguesa de Engenharia de Fachadas



XV Congresso de Construção Metálica e Mista e I Congresso de Engenharia de Fachadas

Copyright © 2025

por Luís Simões da Silva, Paulo Vila Real, Filip Lubinković, Jorge Conde, Rohola Rahnavard, Luís Figueiredo Silva

Editora:

cmm – Associação Portuguesa de Construção Metálica e Mista
Business Center Leonardo da Vinci
Coimbra iParque Lote 3
3040-540 Coimbra, Portugal
Tel.: +351 239 098 422; Tlm.: +351 965 061 249; Fax: +351 239 091 216
Email: cmm@cmm.pt
Url: www.cmm.pt

1ª Edição: Novembro 2025

Não é permitida a reprodução total ou parcial deste livro, o registo em suporte informático, ou a transmissão através de qualquer processo electrónico ou mecânico, sem a prévia autorização por escrito dos titulares dos direitos da edição.

ISBN: 978-989-35292-3-2

Coordenação editorial: Joana Albuquerque
Conceção gráfica da capa: Joana Albuquerque
Formatação de conteúdos e paginação: Joana Filipe Albuquerque

Nota da editora

Este texto foi elaborado a partir da reprodução dos originais preparados pelos autores. Por conseguinte, a editora não pode aceitar qualquer responsabilidade pelo conteúdo, nem por possíveis erros no texto.

Prefácio

O XV Congresso de Construção Metálica e Mista e I Congresso de Engenharia de Fachadas representam um momento de grande relevância para o setor em Portugal, reunindo especialistas, investigadores e empresas num espaço comum de partilha de conhecimento. Nesta décima quinta edição, o Congresso de Construção Metálica e Mista reafirma a maturidade e solidez de um percurso iniciado há mais de duas décadas, consolidando-se como o principal evento técnico-científico nacional dedicado à construção metálica e mista. O crescimento contínuo do número de participantes, comunicações e empresas envolvidas testemunha o reconhecimento da sua importância e o papel que tem desempenhado na promoção da inovação, na disseminação prática do conhecimento e na aproximação entre a academia e a indústria.

Regista-se com satisfação o envolvimento excecional do setor empresarial. O Congresso conta com 80 patrocinadores e uma exposição técnica com 77 stands, números que revelam a confiança e o entusiasmo das empresas na valorização da construção metálica e mista e das fachadas, bem como no papel agregador que este evento desempenha no panorama nacional. No plano técnico-científico, foram submetidos 99 artigos e proferidas 28 palestras, refletindo a intensidade e qualidade da participação da comunidade académica e profissional. A todos expressamos o nosso reconhecimento.

É neste cenário de continuidade, progresso e consolidação que se integra, com especial significado, o I Congresso de Engenharia de Fachadas, que surge como resposta natural à evolução tecnológica do setor e à necessidade de um espaço próprio para discutir temas específicos associados à envolvente dos edifícios. Este novo congresso afirma definitivamente a Engenharia de Fachadas no panorama nacional, como área multidisciplinar, inovadora e essencial para a construção sustentável do futuro, refletindo o avanço das soluções construtivas, a crescente complexidade dos sistemas de fachada e o reconhecimento de que o desempenho do edifício depende, cada vez mais, da qualidade e integração destes elementos.

Num contexto em que a construção enfrenta novos desafios – desde a descarbonização e economia circular, até à necessidade de sistemas construtivos mais eficientes, industrializados e tecnologicamente avançados – este encontro conjunto mostra a capacidade do tecido técnico e industrial português para responder com soluções maduras, competitivas e orientadas para o futuro. A diversidade de comunicações recebidas e a forte participação académica e empresarial atestam o dinamismo do setor e reforçam a importância do diálogo contínuo entre investigação, projeto e indústria.

A fundação em 2025 da EdF – Associação Portuguesa de Engenharia de Fachadas, concretiza uma ambição longamente amadurecida por diversos profissionais e instituições. A EdF nasce para promover o conhecimento técnico, contribuir para a evolução normativa e potenciar a qualidade e visibilidade do trabalho português, dentro e fora do país. Este passo representa não apenas a criação de uma nova entidade, mas a consolidação de uma comunidade empenhada em reforçar competências e abrir novos horizontes à tecnologia de fachadas.

Por fim, a publicação de livro de atas testemunha a vitalidade técnica e científica do Congresso. Reúne trabalhos que refletem o que de mais recente se investiga e pratica, oferecendo um registo permanente do conhecimento aqui partilhado e convidando à reflexão sobre os caminhos que ainda temos por trilhar. Que estas páginas sirvam de referência, inspiração e instrumento de progresso para engenheiros, arquitetos, investigadores, estudantes e todos quantos contribuem para a evolução do setor.

Luís Simões da Silva

Presidente da CMM e da Comissão Organizadora do

XV Congresso de Construção Metálica e Mista e I Congresso de Engenharia de Fachadas

Comissão Organizadora

Luís Simões da Silva, CMM
Filip Ljubinković, UC
Jorge Conde, UPM
Rohola Rahnavard, UC
Luís Figueiredo Silva, CMM

Comissão Científica

Paulo Vila Real, UA
Abílio de Jesus, FEUP
Aldina Santiago, UC
Alejandro Bernabeu, BERNABEU INGENIEROS
Alexandra Feliz, O FELIZ
Alfonso Loureiro, UDC
Altino Loureiro, UC
Ana Espinós Capilla, UPV
Ana Girão Coelho, BCSA
Ana Isabel Silva, IP
António Adão da Fonseca, FEUP
António Matos Silva, MARTIFER SA
António Reis, IST
Artur Mateus, UC
Beatriz Gil, UNAV
Bruno Marques, FERPINTA
Carlos Couto, UA
Carlos Graciano, UNAL
Carlos Muñoz, UPC
Carlos Poço, O POÇO SA
Carlos Rebelo, UC
Constança Rigueiro, IPCB
Daniel Aelenei, UNL
David Andrade, UC
Dinar Camotim, IST
Diogo Ribeiro, ISEP
Dulce Rodrigues, UC
Elsa Caetano, FEUP
Filip Ljubinković, UC
Filipe Santos, VESAM GROUP
Filipe Amarante dos Santos, UNL
Francisco Virtuoso, IST
Hélder Craveiro, UC
Helena Gervásio, UC
Humberto Varum, FEUP

Isabel Valente, UM
Javier Gracia, UNIOVI
João Almeida Fernandes, LNEC
João Pedro Martins, UC João Pires da Fonseca, UBI
João Rocha de Almeida, UNL
Jorge Conde, UPM
Jorge Paiva, CIN
José António Correia, INEGI
José Miguel Castro, FEUP
José Oliveira Pedro, IST
Juan Carlos Vielma, PUCV
Juan Rey, UDC
Leonor Côrte-Real, HEMPEL
Luís Borges, STRUCTURAME
Luís Calado, IST
Luís Câncio, J.L. CÂNCIO MARTINS, LDA
Luís Godinho, UC
Luís Laím, UC
Luís Simões da Silva, UC
Nuno Lopes, UA
Nuno Silvestre, IST
Paulo Cruz, UM
Paulo Piloto, IPB
Paulo Santos, UC
Rodrigo Gonçalves, UNL
Rohola Rahnavard, UC
Rui Alves, PROINDUSTRIAL
Rui Simões, UC
Sandra Jordão, UC
Tiago Abecasis, TAL PROJECTO, Lda
Tiago Mendonça, BETAR
Trayana Tankova, TU DELFT
Victor Ferreira, UA

Comissão Executiva

Luís Figueiredo Silva, CMM

Ana Gomes, CMM

Catarina Gomes, CMM

Flávia Veiga, CMM

Henrique Lima, CMM

Joana Albuquerque, CMM

Pedro Fernandes, CMM

Sérgio Gonçalves, CMM

CMM Associação Portuguesa de Construção Metálica e Mista | **BCSA** British Constructional Steelwork Association | **EdF** Associação Portuguesa de Engenharia de Fachadas | **FEUP** Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto | **INEGI** Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial | **IP** Infraestruturas de Portugal | **IPB** Instituto Politécnico de Bragança | **IPCB** Instituto Politécnico de Castelo Branco | **ISEP** Instituto Superior de Engenharia do Porto | **IST** Instituto Superior Técnico | **LNEC** Laboratório Nacional de Engenharia Civil | **PUCV** Pontificia Universidade Católica de Valparaíso | **TU DELFT** Universidade Técnica de Delft | **UA** Universidade de Aveiro | **UBI** Universidade da Beira Interior | **UC** Universidade de Coimbra | **UDC** Universidade de Corunha | **UM** Universidade do Minho | **UNAL** Universidade Nacional da Colômbia | **UNAV** Universidade de Navarra | **UNIOVI** Universidade de Oviedo | **UNL** Universidade Nova de Lisboa | **UPC** Universidade Politécnica da Catalunha | **UPM** Universidade Politécnica de Madrid | **UPV** Universidade Politécnica da Valência

<i>Desafios no dimensionamento sísmico de estruturas modulares em aço</i>	661
Rita Peres Elisa Cerqueira Cyrus Eshagui José Miguel Castro	
<i>Desempenho estrutural de conectores desmontáveis para construção mista autónoma e robotizada</i>	671
Nuno Gomes Rui Simões Hélder Craveiro	
<i>Desenvolvimento e validação de um setup experimental para ensaios cíclicos biaxiais em colunas tubulares metálicas</i>	681
Elisa Cerqueira Marco Caragliano Rita Peres Melina Bosco Mario D’Aniello José Miguel Castro	
<i>Efeitos de diafragma rígido na análise sísmica de edifícios modulares em aço</i>	689
Paola Silva Rita Peres Nuno Neves José Miguel Castro	
<i>Eficiência económica de ligações fabricadas por fabrico aditivo</i>	699
Trayana Tankova Rui Matos Renata Obiala	
<i>Encurvadura lateral de vigas em I submetidas à flexão biaxial</i>	707
David Henriques Rodrigo Gonçalves	
<i>Enscadeiras metálicas especiais para reforço e reabilitação de fundações de pontes existentes</i>	719
Paulo Ramos Laura Esteves	
<i>Estudo das ações do vento em estruturas solares fixas com recurso a simulação CFD</i>	729
Bruno Gonçalves Tiago Silva	
<i>Estudo paramétrico da influência do vento no dimensionamento de torres tubulares de aço com diferentes geometrias segundo os eurocódigos</i>	741
Márcio Carvalho Rui Oliveira Maria Fernanda Rodrigues Tiago Silva Hugo Rodrigues	
<i>Evaluation of N-M-V interaction in steel plated girders</i>	751
José Oliveira Pedro André Biscaya Sérgio Nascimento Ulrike Kuhlmann	
<i>Fire resistance of protected composite slab with a stiffened lower flange steel deck</i>	763
Paulo Piloto Otavio Ribeiro Gustavo Gidrão	
<i>General formulation for the buckling resistance of high-strength steel S690 slender i-section beams</i>	775
José Ferreira Filho Luís Simões da Silva Trayana Tankova Hermes Carvalho	
<i>Genetic algorithm optimisation of welded joint components for moment–rotation response and pinn-driven surrogate modelling</i>	785
Aleksa Milićević Filip Ljubinković Ana Francisca Santos Luís Simões da Silva	
<i>Local buckling strength of aluminium alloy square tubes with reinforcement ribs</i>	795
Atsushi Sato Annarosa Lettieri	
<i>Machine learning applications for evaluating fire performance of steel-framed buildings: A review</i>	805
Pegah Aghabozorgi Luís Laím Aldina Santiago Carlos Couto	
<i>Mechanical behavior of adaptable high strength steel joints with long slotted holes</i>	817
Adriano Carvalho Teodora Bogdan Christoph Odenbreit	
<i>Modelação e avaliação numérica de conectores de corte do tipo tubular perfobond com adoção de armadura passante</i>	827
Keila Souza André Silva José Henriques Luciano Lima Monique Rodrigues	



ESTUDO PARAMÉTRICO DA INFLUÊNCIA DO VENTO NO DIMENSIONAMENTO DE TORRES TUBULARES DE AÇO COM DIFERENTES GEOMETRIAS SEGUNDO OS EUROCÓDIGOS

Carvalho, Márcio ^{a*}, Oliveira, Rui A. F. de ^b, Rodrigues, Maria F. ^c, Silva, Tiago ^d,
Rodrigues, Hugo ^e

^{a,b,c,e} *Universidade de Aveiro*

^{a,d} *Metalogalva - Irmãos Silva, S. A., Technical and Innovation & Development Department, Trofa, PT*

* Autor para contacto. Tel.: +351 934 212 878; E-mail: marcio.carvalho@ua.pt

Resumo. As geometrias das torres tubulares metálicas influenciam diretamente a interação da ação do vento com a resposta estrutural da própria estrutura, analisar essas configurações e a forma como essa interação ocorre é fundamental para o seu dimensionamento. A investigação desenvolvida apresenta e discute os resultados obtidos na realização de um estudo paramétrico da influência do vento sobre uma torre tubular metálica com diferentes geometrias, considerando os efeitos de 2º ordem, de acordo com os eurocódigos 1 e 3. O objetivo é observar e analisar a influência da variação de alguns parâmetros principais da torre e sua resposta estrutural, para além da influência dessas alterações na interação da ação do vento. Para isso, foram consideradas diferentes configurações geométricas, variando o número de lados do fuste e os diâmetros da base e do topo da torre, mantendo uma mesma espessura para parede do fuste. Foram analisados o comportamento global da estrutura, com foco na obtenção de alguns parâmetros da torre, como deslocamento no topo, deformação máxima, rácio máximo de sollicitação e peso da estrutura. Também foram analisadas as sollicitações induzidas pelo vento e a influência das alterações geométricas, para obtenção de alguns parâmetros da interação entre o vento e a estrutura, como o coeficiente estrutural (c_{scd}), que tem em conta o efeito da não simultaneidade na ocorrência de pressões de pico sobre a superfície, em conjunto com o efeito das vibrações da estrutura devidas à turbulência. Os resultados permitem identificar as tendências e sensibilidades relevantes para o dimensionamento eficiente de torres metálicas tubulares sujeitas à ação do vento, contribuindo para o desenvolvimento de diretrizes de projeto mais otimizadas.

1. Introdução

A utilização de estruturas de aço na engenharia civil cresceu bastante nos últimos anos, muito decorrente das vantagens inerentes ao material, tanto relacionadas às características mecânicas, quanto relacionadas ao próprio custo de fabricação e facilidade na padronização. A utilização

do aço é uma das principais alternativas quanto ao desenvolvimento de projetos de estruturas, visto o desempenho estrutural, eficiência e praticidade [1].

Até à década de 70 ainda não existiam procedimentos específicos para análise e dimensionamento de torres relativamente altas. A sua análise e utilização, sejam estas tubulares ou reticuladas foi essencialmente desenvolvida nos últimos anos. Muito se deve ao aumento da demanda por conectividade, fomentando esse crescimento [2-6].

O estudo do comportamento dinâmico das torres é indispensável, visto que esse tipo de estrutura é caracterizado pela leveza e flexibilidade, acarretando assim numa capacidade de amortecimento reduzida, sendo sujeitas a fenômenos relacionados à ação do vento [7-8].

Para esse tipo de estrutura, a maioria dos acessórios são expostos também à ação do vento, mesmo não sendo componentes estruturais, a análise da exposição dos ventos nesses acessórios é de extrema importância. Esses acessórios podem ser desde escadas, plataformas de trabalhos, cabos, além dos suportes das antenas e dos cabos, aumentando a complexidade do projeto, no qual, acaba exigindo uma análise mais detalhada e criteriosa. Logo, qualquer alteração de equipamentos instalados durante a vida útil deve ser levada em consideração, pois incertezas nas cargas podem levar a problemas estruturais futuros [9].

Visto que se trata de estruturas maioritariamente expostas à ação do vento, sua quantificação deve ser feita de forma criteriosa, principalmente dada sua natureza dinâmica e aleatória, na qual acarreta numa complexidade maior [10-11].

O presente estudo foi estruturado em seis partes, na primeira são introduzidos o tema sobre torres tubulares em aço e a importância desse tipo de estrutura. Já na segunda parte é apresentado uma fundamentação teórica relacionando o cálculo do vento e a força exercida na estrutura, de acordo com os eurocódigos, além de um resumo do cálculo estrutural. Na terceira parte é apresentado a metodologia utilizada do estudo, seguido da parte quatro, onde são apresentados os dados de estudo e as premissas utilizadas. Por fim as partes cinco e seis apresentam os resultados do estudo paramétrico, bem como a conclusão final.

2. Fundamentação Teórica

Nesta secção é apresentada a fundamentação teórica considerada para o estudo paramétrico realizado, com foco principal na definição da ação do vento, visto que é a ação mais condicionante para o tipo de estrutura a ser estudado.

2.1 Ação do vento

Nesta subsecção é apresentado o cálculo da ação do vento a ser aplicado nas estruturas do estudo; a definição da pressão do vento é realizada de forma independente da estrutura, ou seja, não depende do tipo de estrutura a ser estudada, mas sim dos parâmetros do local de instalação de cada estrutura. Essa pressão posteriormente é convertida em força, na qual procede-se à aplicação dessa força na própria estrutura.

2.1.1 Pressão do vento

A velocidade do vento e a pressão dinâmica podem ser compreendidas em duas componentes principais, uma que pode ser denominada como componente média constante e outra como componente flutuante [12]. Onde temos a velocidade média (v_m), calculada de acordo com um valor de referência de velocidade do vento, no qual depende do local de estudo, também em função da altura de análise, da rugosidade do terreno e da orografia do local. Já a componente flutuante pode ser caracterizada pela intensidade de turbulência, na qual também varia de acordo com a altura de análise.

Para cálculo da pressão do vento de rajada ($q_{p(z)}$) que resulta da velocidade média e da intensidade de turbulência (flutuações de curta duração da velocidade do vento) em conjunto, tem de se levar em conta a rugosidade do terreno ($c_{r(z)}$), o coeficiente orográfico ($c_{o(z)}$), a turbulência do vento ($I_v(z)$) e a velocidade básica do vento, que depende da velocidade básica de referência do vento levando em consideração a direção do vento (c_{dir}) e a sazonalidade (c_{season}) [13].

$$q_p(z) = [1 + 7 * I_v(z)] * \frac{1}{2} * \rho * v_m^2(z) \quad (1)$$

2.1.2 Força do vento

A força do vento exercida numa estrutura ou num componente estrutural pode ser definida pela seguinte expressão:

$$F_w = c_s c_d * \sum_{\text{elementos}} c_f * q_p(Z_e) * A_{ref} \quad (2)$$

Onde temos $c_s c_d$ como coeficiente estrutural, c_f como coeficiente de força, q_p como pressão dinâmica de pico à altura de referência e uma área de referência. Para a determinação do coeficiente de força, deve-se considerar a seção da estrutura ou de um de seus segmentos. No presente estudo, por se tratar de uma seção poligonal regular com cinco ou mais lados, o coeficiente de força é definido por:

$$c_f = c_{f,0} \Psi_\lambda \quad (3)$$

Onde tem-se Ψ_λ definido como coeficiente de extremidade e $c_{f,0}$ o coeficiente de força para elementos estruturais sem livre escoamento em torno das extremidades, podendo ser definido de acordo com a tabela 7.11 do EC1-1-4 [13].

2.3 Coeficiente estrutural ($c_s c_d$)

O coeficiente estrutural $c_s c_d$ considera tanto o efeito da não simultaneidade das pressões de pico (c_s) quanto a influência das vibrações induzidas pela turbulência (c_d) [13]. É definido por:

$$c_s c_d = \frac{1 + 2 * k_p * I_v(z_s) * \sqrt{B^2 + R^2}}{1 + 7 * I_v(z_s)} \quad (4)$$

A altura de referência z_s , corresponde a 60% da altura total da torre, de acordo com EC1-4. O coeficiente envolve ainda um fator de pico k_p (máximo entre a resposta flutuante e o desvio padrão) e dois parâmetros: o de resposta quase-estática (B^2) e o de ressonância (R^2). O primeiro considera a falta de correlação das pressões na superfície da torre, enquanto o segundo representa o efeito da turbulência em ressonância com os modos de vibração [13].

O cálculo de $c_s c_d$ pode ser decomposto nos coeficientes de dimensão (c_s) e dinâmico (c_d). O coeficiente c_s expressa a redução da ação do vento, uma vez que os picos de pressão não ocorrem simultaneamente ao longo da torre:

$$c_s = \frac{1 + 7 * I_v(z_s) * \sqrt{B^2}}{1 + 7 * I_v(z_s)} \quad (5)$$

Já o coeficiente dinâmico c_d reflete o aumento da ação do vento causado pelas vibrações em ressonância com a estrutura:

$$c_d = \frac{1 + 2 * k_p * I_v(z_s) * \sqrt{B^2 + R^2}}{1 + 7 * I_v(z_s) * \sqrt{B^2}} \quad (6)$$

No presente estudo, para determinação do fator de pico (k_p) e os parâmetros B e R foi utilizado o anexo B do EC1-1-4 [13].

2.4 Cálculo Estrutural

O cálculo estrutural foi realizado com auxílio de uma folha de cálculo desenvolvida no software Microsoft Excel, com o auxílio de codificação desenvolvida em VBA (Visual Basic for Applications), combinada também com o software Robot Structural Analysis (versão 2025), sendo embasada de acordo com os eurocódigos: EN 1990:2002/A1:2005 [14], EN 1991-1-1:2002 [15], EN 1991-1-4:2005 [13], EN 1993-1-1:2005 [16], EN 1993-3-1:2006 [17], EN 1993-3-2:2006 [18].

De forma resumida, a verificação consiste em comparar as tensões devido as forças combinadas em relação à resistência da secção, tendo em conta os coeficientes parciais de segurança aplicáveis. A verificação pode ser expressa pela seguinte equação:

$$\frac{N_{sd}}{A} + \frac{M_{sd}}{W_x} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M1}} \quad (7)$$

Onde temos N_{sd} como força normal atuante, A como área da secção a ser verificada (todas secções foram definidas para enquadrar como no máximo classe 3, de acordo com EN50341-1:2001 – Anexo K [19], não foram tratadas secções classe 4 no presente trabalho). Também se tem M_{sd} como momento fletor atuante, W_x como módulo de flexão, f_y como tensão do aço (tensão de escoamento) e γ_{M1} como coeficiente parcial do material.

Para definição da tensão atuante também foi utilizado o critério de falha de Von-Mises (máxima energia de distorção), que é amplamente utilizado na predição do escoamento de materiais dúcteis sob condições de carregamento multiaxial, permitindo avaliar a estrutura frente a diferentes estados de tensões combinadas [20].

Para determinação dos deslocamentos no topo da estrutura, tratando-se teoricamente de uma estrutura isostática, considerando um encastramento perfeito, foi utilizado o método da integração dupla (Equação da linha elástica), que relaciona o momento fletor com sua deflexão através da rigidez EI , sendo E o módulo de elasticidade e I o momento de inércia. Essa abordagem permite uma estimativa analítica da resposta estrutural neste tipo de estrutura [21].

Já para cálculo da frequência da estrutura, foi utilizado o método de Rayleigh [22], onde consegue-se estimar a primeira frequência natural baseando-se no princípio de conservação da energia. Essa aproximação foi posteriormente validada por meio de simulações no Robot Structural Analysis.

No presente trabalho não foi realizado uma análise de risco para instabilidade aero-elástica, fenómenos como vortex shedding não foram levados em consideração.

3. METODOLOGIA

O objetivo principal do estudo é observar e analisar a influência da variação de alguns parâmetros da torre tubular, como o número de lados do fuste (secção poligonal) e os diâmetros de base e de topo. Foi aplicada a mesma condição de vento para as diferentes configurações estruturais estudadas, a fim de permitir uma comparação direta dos efeitos geométricos da torre.

Para realização do estudo paramétrico, foi utilizada uma folha de cálculo desenvolvida no software Microsoft Excel, com suporte em codificação VBA (Visual Basic for Applications). Também se utilizou o software Robot Structural Analysis como auxílio para validação. O procedimento dos cálculos foi realizado de forma iterativa, alternando os diferentes parâmetros da estrutura a serem observados, enquadrando todas as condições apresentadas. Finalizando com a colheita e análise dos resultados segundo os estados limites de utilização (ELS) e último (ELU) para cada iteração.

Como apoio ao fluxo do cálculo, foi realizada uma pesquisa de referências bibliográficas, utilizando-se de alguns bancos de dados, como Google Scholar, MDPI, ScienceDirect e IOPScience, além das normativas para o desenvolvimento dos cálculos. Abaixo encontra-se uma representação esquemática (Figura 1) com a metodologia utilizada no presente estudo:

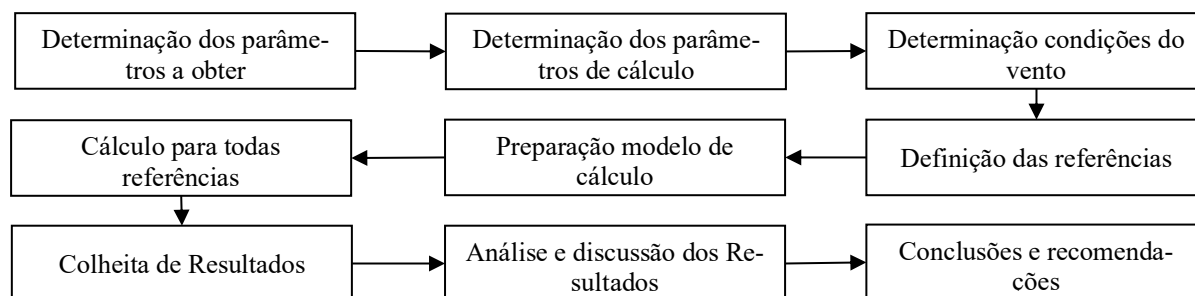


Fig. 1: Representação esquemática da metodologia

4. DADOS DO ESTUDO

Foi definida uma estrutura tubular como referencial, posteriormente variando os parâmetros de acordo com esse referencial. Como estrutura de referência, foi adotado como diâmetros de base e de topo 600 mm e 300 mm respectivamente, dispostos em um único troço de 15 m, com uma espessura de 6 mm e uma seção com uma forma poligonal de 12 lados.

4.1 Variações geométricas

No estudo, as variações são definidas em três pontos principais: diâmetro na base, diâmetro no topo e quantidade de lados. Esses parâmetros foram avaliados de forma independente, ou seja, para um mesmo diâmetro de base e número de lados, foi-se alterando o diâmetro de topo e verificando a resposta estrutural e os demais parâmetros que englobam tanto a ação do vento quanto a própria estrutura.

Na Tabela 1 a seguir encontra-se definido o referencial para cada um desses três parâmetros e os limites de variação (mínimo e máximo), também é incluindo uma taxa de variação:

Tabela 1: Variações geométricas do estudo

Descrição	Referencial	Mínimo	Máximo	Taxa de variação Δ (mm)
Diâmetro de Topo	300 mm	150 mm	450 mm	25 mm
Diâmetro de base	600 mm	450 mm	750 mm	25 mm
Número de lados	12	12	16	4

A Figura 2 a seguir apresenta um esquema das variações que foram realizadas no estudo, partindo sempre de um referencial:

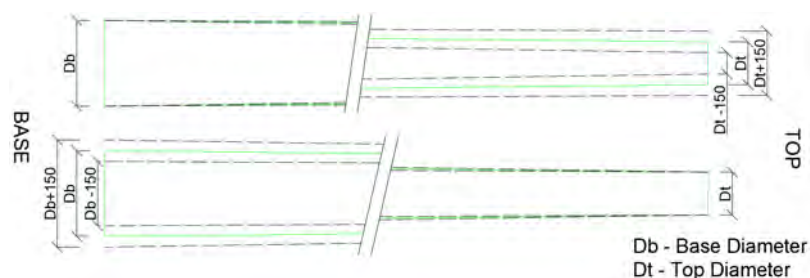


Fig. 2: Esquema de variações realizadas no estudo

Foram realizadas cerca de 50 variações, com isso, sendo analisados os seguintes parâmetros: Deslocamento no topo, deflexão máxima, rácio máximo de sollicitação e peso da estrutura.

4.2 Considerações de cálculo

Para o estudo, foi considerado que a ligação à fundação acontece de forma perfeitamente rígida, ou seja, não sendo considerados possíveis deslocamentos significativos na interface entre a estrutura e o solo. Esse modelo é uma simplificação de cálculo e sua análise dessa conexão é de extrema importância, porém não é objetivo do presente trabalho, sendo analisada apenas a torre em si.

Para o cálculo do vento, foi considerada uma velocidade básica de referência de aproximadamente 30m/s (Similar à zona B em Portugal), com uma categoria de terreno II. Parâmetros como coeficiente de sazão (c_{season}), coeficiente de direção (c_{dir}) e coeficiente orográfico ($c_{o(z)}$) foram considerados como 1.0.

Em termos de área de exposição de equipamentos, foi considerada uma área de projeção de aproximadamente 3,0 m² com coeficiente de força de 1,0, a simular a projeção de equipamentos hipotéticos para o estudo. Também foi considerado um peso de aproximadamente 3 toneladas para os mesmos equipamentos, além de uma escada de acesso, que representa cerca de 0,15 m²/m de área de exposição, com um coeficiente de força de 1.2, disposta em toda a altura da estrutura.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

No presente capítulo são apresentados os resultados do presente estudo, com embasamento na verificação e influência da variação de determinados parâmetros estruturais de uma estrutura tubular em aço. Os resultados são apresentados por variação, de forma conjunta por estudo realizado, ou seja, num mesmo resultado consegue-se visualizar os resultados tanto da variação dos diâmetros de topo quanto dos diâmetros de base. Serão apresentadas também as análises realizadas para secções poligonais com 12 e 16 lados.

5.1 Influência nos deslocamentos e deflexões máximas

Como referido anteriormente, os deslocamentos foram obtidos pelo método da integração dupla (Equação da linha elástica), sendo apresentados os resultados obtidos no topo da estrutura. Foram avaliados tanto o deslocamento (translação, em cm) quanto a deflexão (rotação, em graus), os resultados são apresentados nas Figuras 3 e 4 a seguir:

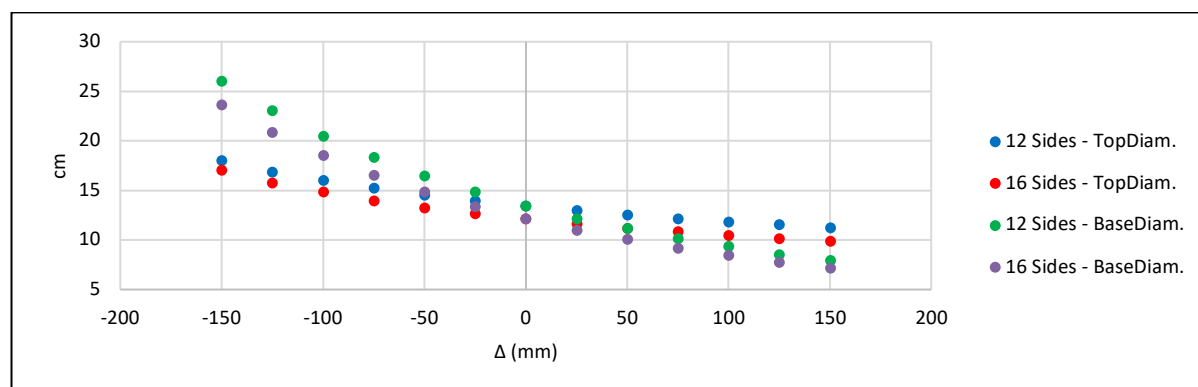


Fig. 3: Resultados para deslocamentos em cm

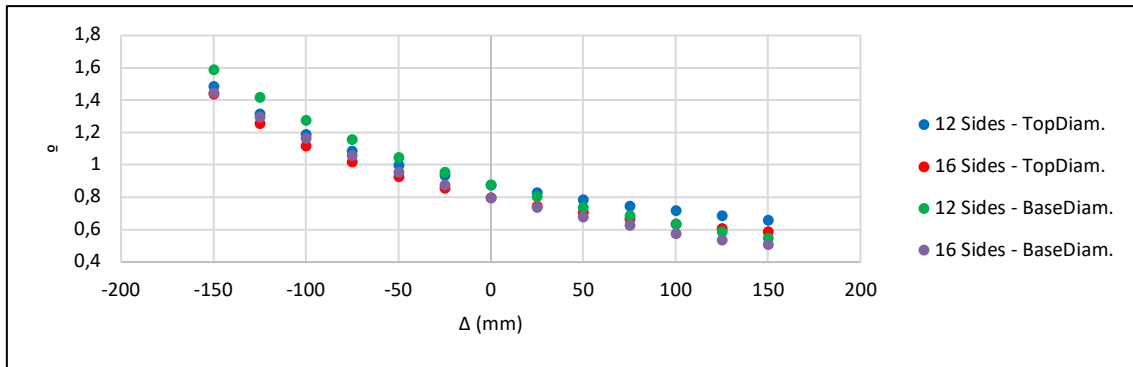


Fig. 4: Resultados para deflexão em graus

Percebe-se uma diferente variação entre as translações no topo e as deflexões medidas no mesmo ponto. Tendo as variações no diâmetro de base para 16 lados uma amplitude maior se comparada às outras, obtendo uma redução de aproximadamente 65% entre o menor e maior diâmetro de base em termos de deflexão e 70% em termos de deslocamentos. Também apresenta uma diferença relativamente significativa entre as soluções de 12 e 16 lados.

5.2 Rácio máximo entre solicitação e resistência (ELU)

Já na análise entre o rácio máximo entre tensão atuante e tensão resistente (Figura 5), foi utilizada uma estrutura com classe de fiabilidade 3, de acordo com o EC3-3-1 [17], tendo como coeficiente parcial de segurança 1.2 para ações permanentes e 1.6 para ações variáveis, tendo em conta sempre o tipo de efeito desfavorável. O aço utilizado foi um de classe S355, mantendo sempre as seções em classe 3, de acordo com a EN50341 [19].

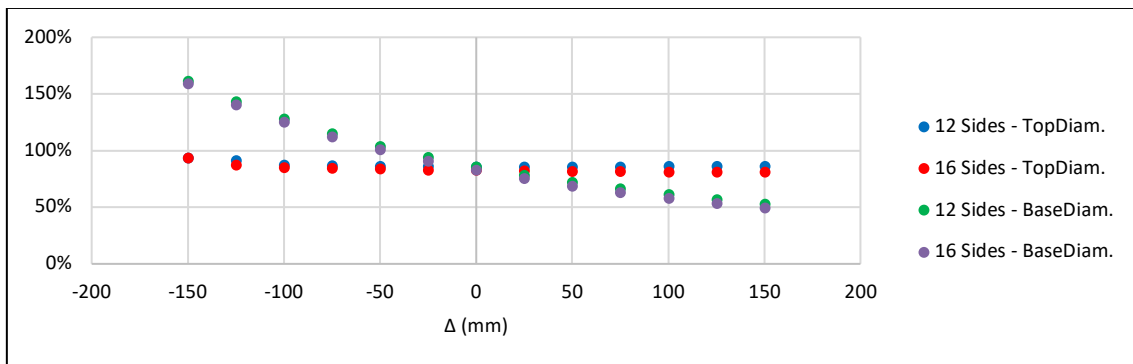


Fig. 5: Resultados para rácio entre tensão atuante (ELU) e tensão resistente

Os resultados mostram que a diferença na análise em ELU para 12 e 16 lados não apresenta uma diferença significativa, principalmente quando comparada às análises em ELS. As diferenças são mais perceptíveis quando alterado o diâmetro de base, isso ocorre uma vez que, os esforços internos, em especial os momentos fletores, são mais elevados em níveis mais baixos (próximos a base da estrutura), condicionando de forma mais crítica o comportamento global.

5.3 Coeficiente estrutura $c_s c_d$

Para o coeficiente estrutural $c_s c_d$, foram apresentados apenas os resultados para o valor final do $c_s c_d$ (Figura 6), tratando-se de utilizar sempre as mesmas condições do vento, o valor de c_s foi sempre 0.914, havendo alterações por cada referência apenas nos valores de c_d .

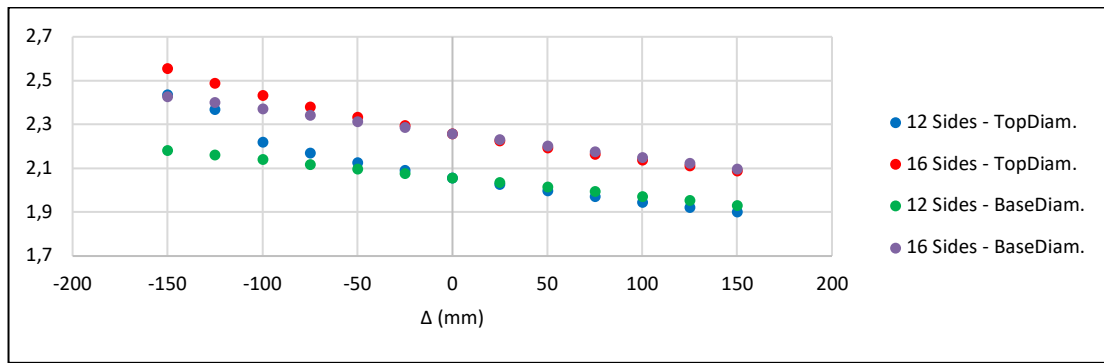


Fig.6: Resultados para coeficiente estrutural csd

Para os resultados, as alterações relacionadas ao diâmetro de base tiveram uma tendência a se igualarem entre 12 e 16 lados. Já para as variações do diâmetro de topo, percebe-se uma grande diferença se comparado aos outros, com cerca de 22% de redução. Também relacionado de forma direta com o coeficiente estrutural, foi avaliado as frequências naturais (1º modo) para todas referências, calculadas de acordo com método de Rayleigh (Figura 7).

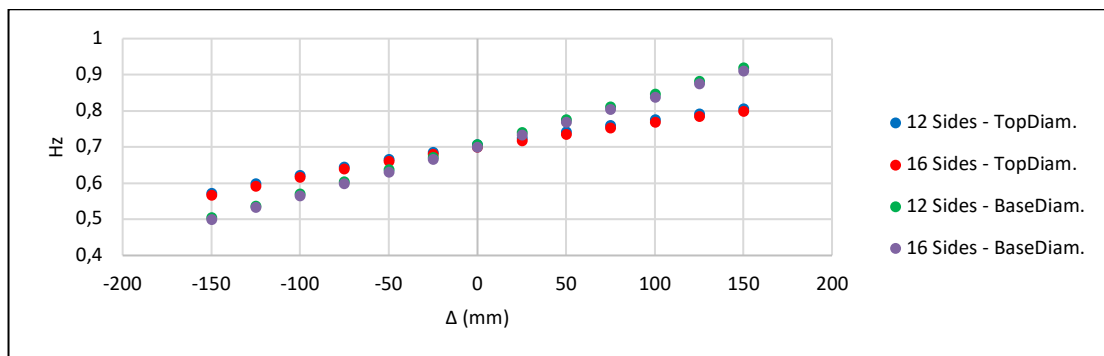


Fig. 7: Resultados para frequência natural

Observou-se uma diferença de resultados maior entre as alterações de diâmetro no topo, porém uma menor diferença se comparado a relação entre a quantidade de lados. Já nos resultados variando o diâmetro de topo tem-se cerca de 41% de aumento entre a referência -150 para +150, comparado com cerca de 82% de aumento para os valores de diâmetro de base.

5.4 Peso da estrutura

Sendo um dos parâmetros mais importantes em termos económicos, foram também avaliados os resultados em para o peso da estrutura (Figura 8) para as diferentes variações.

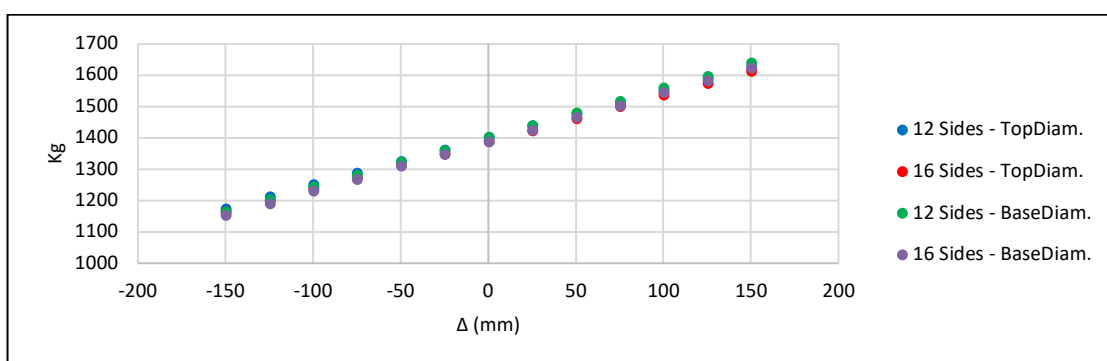


Fig. 8: Resultados para pesos

Em termos de peso, percebe-se uma quase semelhança entre as variações de diâmetros de topo e de base, tendo uma variação baixa, o mesmo acontece para a relação entre estrutura de 12 e 16 lados. Obteve-se cerca de 39% de aumento de peso entre -150 a 150 variando diâmetros de topo e cerca de 41% para as variações de diâmetro de base com as mesmas condições.

6. CONCLUSÕES

O estudo teve como objetivo principal observar e analisar a influência da variação de alguns parâmetros principais da torre e sua resposta estrutural, dimensionada de acordo com os euro-códigos 1 e 3, e a influência dessas alterações na interação da ação do vento com a estrutura. Para isso, foram consideradas as diferentes configurações geométricas alterando, de acordo com um referencial, algumas das características da estrutura tubular, nomeadamente a quantidade de lados e diâmetros da base e do topo, mantendo a espessura do fuste e a altura da torre.

Os resultados revelaram tendências relevantes no comportamento global da estrutura para os diversos parâmetros analisados. Observou-se que para os diferentes objetivos de projeto pode-se ter diferentes tendências, como por exemplo, em termos de deslocamento em ELS consegue-se reduzir significativamente o diâmetro de topo com um efeito mitigado em termos de segurança estrutural (ELU), porém para mesma análise em ELS tem-se uma redução significativa na deflexão, o que pode ser comprometedor, principalmente quando se trata de torres de telecomunicações, onde a deflexão é um ponto crucial.

Já relacionado à interação entre o vento e a estrutura, os resultados do estudo apresentaram variações significativas no $c_s c_d$, não relacionado a redução do vento devido ocorrência da não simultaneidade das pressões na superfície (coeficiente c_s), mas sim para o coeficiente dinâmico, que tem em conta o aumento da ação do vento causado pelas vibrações em ressonância com a estrutura, o que demonstra também, a sensibilidade das torres a alterações geométricas.

Em termos económicos, o peso da estrutura apresenta diferenças relativamente reduzidas entre as alternativas que foram analisadas, demonstrando assim um comportamento de certa forma consistente entre os diâmetros de topo e de base, bem como para as soluções de 12 e 16 lados.

Em síntese, o estudo comprova que uma otimização de geometria pode desempenhar um papel importante em termos de eficiência e desempenho estrutural. Os resultados obtidos oferecem uma base comparativa para futuras investigações em termos de otimização estrutural de torres tubulares em aço.

Referências

- [1] Santos Falcon, Gines Arturo; Santos da Silva, José Guilherme (2004). Metodologia de análise para o projeto ótimo de torres de aço com a consideração da estabilidade global da estrutura. *Revista internacional de métodos numéricos para cálculo y diseño en ingeniería*, 2004, vol. 20, núm. 4. <https://raco.cat/index.php/RevistaMetodosNumericos/article/view/123761>.
- [2] Travanca, Rui; Varum, Roberto; Vila Real; Paulo (2012). The past 20 years of telecommunication structures in Portugal. *Engineering Structures*, 48 (2012) 472-485. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.10.012>.
- [3] Smith, Bian (2009). 50 Years in the Design of Towers and Masts. From IASS Recommendations to Current Practice. *Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium 2009, Valencia*.
- [4] Avikal, Shwetank [et al.] (2021). A decision-making approach for installation of telecom tower. *Materials Today: Proceedings*, 46, Part 20 (2021) 11084-11086. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.228>

- [5] Filipe, João (2012). Estudo paramétrico da ação do vento em torres metálicas de telecomunicações [tese de mestrado, Universidade Lusófona]. Repositório Institucional da Universidade Lusófona. <http://hdl.handle.net/10437/6216>
- [6] Travanca, Rui (2010). Torres para radiocomunicações: patologias e dimensionamento [tese de mestrado, Universidade de Aveiro]. Repositório Institucional da Universidade de Aveiro. <http://hdl.handle.net/10773/4387>
- [7] Taigildin, Anton (2021). Dimensionamento otimizado de torres de telecomunicações [tese de mestrado, Universidade do Porto]. Repositório Institucional da Universidade do Porto. <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/135160/2/485040.pdf>
- [8] Filipe, João [et al.] (2014). Monopolos auto-suportados para telecomunicações. A influência da localização e da geometria da estrutura na definição da ação do vento. 5as Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas – JPEE 2014, 2014, 16p. <https://repositorio.lnec.pt/jspui/handle/123456789/10070265>
- [9] Filipe, João [et al.] (2014). Monopolos auto-suportados para telecomunicações. A influência dos equipamentos na definição da ação do vento. 5as Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas – JPEE 2014, 2014, 16p. <https://repositorio.lnec.pt/jspui/handle/123456789/1007026>
- [10] Ferrão, Sérgio (2012). Dimensionamento de um mastro metálico [tese de mestrado, Universidade Nova]. Repositório Institucional da Universidade Nova. <http://hdl.handle.net/10362/8864>
- [11] Filipe, João [et al.] (2025). Impact of geometrical and environmental parameters on wind action in telecommunication monopoles. Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas. Ed. LNEC. Série III. n.º 27. (março 2025) 51-66. <https://doi.org/10.34638/rpee-sIII-n27-004>
- [12] Antunes, Antonio (2008). Projecto de postes e mastros tubulares [tese de mestrado, Universidade do Porto]. Repositório Institucional da Universidade de Porto. <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/58843/1/000129588.pdf>
- [13] CEN – EN 1991 1-4. Eurocode 1, Actions on structures, Part 1-4: General actions – Wind actions. 2005, 146 p.
- [14] CEN - EN 1990. Eurocode – Basis of structural design, 2002, 87 p.
- [15] CEN EN 1991-1-1:2002. Eurocode 1, Actions on structures, Part 1-1: General actions – Densities, self-weight, imposed loads for buildings, 2002, 44 p.
- [16] CEN EN 1993-1-1:2005. Eurocode 3, Design of steel structures, Part 1-1: General rules and rules for building, 2005, 91 p.
- [17] CEN – EN 1993 3-1. Eurocode 3, Design of steel structures, Part 3-1: Towers, masts and chimneys – Towers and masts, 2006, 79 p.
- [18] CEN – EN 1993 3-2. Eurocode 3, Design of steel structures, Part 3-1: Towers, masts and chimneys – Chimneys, 2006, 30 p.
- [19] CENELEC – EN 50341-1: 2001. Overhead electrical lines exceeding AC 45 kV – Part 1: General requirements – Common specifications, 2001.
- [20] Wang, Yuan-Zuo [et al.] (2021). Simplified method to identify full von Mises stress-strain curve of structural metals. Journal of Constructional Steel Research, Vol. 181, 106624. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2021.106624>.
- [21] Mirambell, E; Real, E (2000). On the calculation of deflections in structural stainless steel beams: an experimental and numerical investigation. Journal of Constructional Steel Research, Vol. 54, Issue 1, 2000, Pages 109-133. [https://doi.org/10.1016/S0143-974X\(99\)00051-6](https://doi.org/10.1016/S0143-974X(99)00051-6).
- [22] Al-Ansari, Luay. (2013). Calculating static deflection and natural frequency of static deflection and natural frequency of stepped cantilever beam using modified Rayleigh method. International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development (IJMPERD), Vol. 3, Issue 4, 107-118. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:201858327>