



Franciele Braga Machado Tullio
Lucio Mauro Braga Machado
(Organizadores)

A Aplicação do Conhecimento Científico na Engenharia Civil

3

Atena
Editora
Ano 2020



Franciele Braga Machado Tullio
Lucio Mauro Braga Machado
(Organizadores)

A Aplicação do Conhecimento Científico na Engenharia Civil

3


Ano 2020

2020 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do Texto © 2020 Os autores

Copyright da Edição © 2020 Atena Editora

Editora Chefe: Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Diagramação: Camila Alves de Cremo

Edição de Arte: Lorena Prestes

Revisão: Os Autores



Todo o conteúdo deste livro está licenciado sob uma Licença de Atribuição *Creative Commons*. Atribuição 4.0 Internacional (CC BY 4.0).

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores. Permitido o download da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

Conselho Editorial

Ciências Humanas e Sociais Aplicadas

Profª Drª Adriana Demite Stephani – Universidade Federal do Tocantins

Prof. Dr. Álvaro Augusto de Borba Barreto – Universidade Federal de Pelotas

Prof. Dr. Alexandre Jose Schumacher – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso

Profª Drª Angeli Rose do Nascimento – Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro

Prof. Dr. Antonio Carlos Frasson – Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof. Dr. Antonio Gasparetto Júnior – Instituto Federal do Sudeste de Minas Gerais

Prof. Dr. Antonio Isidro-Filho – Universidade de Brasília

Prof. Dr. Carlos Antonio de Souza Moraes – Universidade Federal Fluminense

Profª Drª Cristina Gaio – Universidade de Lisboa

Profª Drª Denise Rocha – Universidade Federal do Ceará

Prof. Dr. Deyvison de Lima Oliveira – Universidade Federal de Rondônia

Prof. Dr. Edvaldo Antunes de Farias – Universidade Estácio de Sá

Prof. Dr. Eloi Martins Senhora – Universidade Federal de Roraima

Prof. Dr. Fabiano Tadeu Grazioli – Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões

Prof. Dr. Gilmei Fleck – Universidade Estadual do Oeste do Paraná

Prof. Dr. Gustavo Henrique Cepolini Ferreira – Universidade Estadual de Montes Claros

Profª Drª Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionele delle Figlie de Maria Ausiliatrice

Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense

Profª Drª Keyla Christina Almeida Portela – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso

Profª Drª Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins

Prof. Dr. Luis Ricardo Fernandes da Costa – Universidade Estadual de Montes Claros

Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte

Prof. Dr. Marcelo Pereira da Silva – Universidade Federal do Maranhão

Profª Drª Miranilde Oliveira Neves – Instituto de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará

Profª Drª Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa

Profª Drª Rita de Cássia da Silva Oliveira – Universidade Estadual de Ponta Grossa

Profª Drª Sandra Regina Gardacho Pietrobon – Universidade Estadual do Centro-Oeste

Profª Drª Sheila Marta Carregosa Rocha – Universidade do Estado da Bahia

Prof. Dr. Rui Maia Diamantino – Universidade Salvador

Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará

Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande

Prof. Dr. William Cleber Domingues Silva – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

Ciências Agrárias e Multidisciplinar

Prof. Dr. Alexandre Igor Azevedo Pereira – Instituto Federal Goiano
Prof. Dr. Antonio Pasqualetto – Pontifícia Universidade Católica de Goiás
Prof. Dr. Cleberton Correia Santos – Universidade Federal da Grande Dourados
Profª Drª Daiane Garabeli Trojan – Universidade Norte do Paraná
Profª Drª Diocléa Almeida Seabra Silva – Universidade Federal Rural da Amazônia
Prof. Dr. Écio Souza Diniz – Universidade Federal de Viçosa
Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul
Prof. Dr. Fágner Cavalcante Patrocínio dos Santos – Universidade Federal do Ceará
Profª Drª Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Prof. Dr. Júlio César Ribeiro – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Profª Drª Lina Raquel Santos Araújo – Universidade Estadual do Ceará
Prof. Dr. Pedro Manuel Villa – Universidade Federal de Viçosa
Profª Drª Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará
Profª Drª Talita de Santos Matos – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Tiago da Silva Teófilo – Universidade Federal Rural do Semi-Árido
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas

Ciências Biológicas e da Saúde

Prof. Dr. André Ribeiro da Silva – Universidade de Brasília
Profª Drª Anelise Levay Murari – Universidade Federal de Pelotas
Prof. Dr. Benedito Rodrigues da Silva Neto – Universidade Federal de Goiás
Prof. Dr. Edson da Silva – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri
Profª Drª Eleuza Rodrigues Machado – Faculdade Anhanguera de Brasília
Profª Drª Elane Schwinden Prudêncio – Universidade Federal de Santa Catarina
Profª Drª Eysler Gonçalves Maia Brasil – Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira
Prof. Dr. Ferlando Lima Santos – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Prof. Dr. Fernando José Guedes da Silva Júnior – Universidade Federal do Piauí
Profª Drª Gabriela Vieira do Amaral – Universidade de Vassouras
Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria
Profª Drª Iara Lúcia Tescarollo – Universidade São Francisco
Prof. Dr. Igor Luiz Vieira de Lima Santos – Universidade Federal de Campina Grande
Prof. Dr. José Max Barbosa de Oliveira Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará
Prof. Dr. Luís Paulo Souza e Souza – Universidade Federal do Amazonas
Profª Drª Magnólia de Araújo Campos – Universidade Federal de Campina Grande
Prof. Dr. Marcus Fernando da Silva Praxedes – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Profª Drª Mylena Andréa Oliveira Torres – Universidade Ceuma
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federaci do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Paulo Inada – Universidade Estadual de Maringá
Profª Drª Renata Mendes de Freitas – Universidade Federal de Juiz de Fora
Profª Drª Vanessa Lima Gonçalves – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande

Ciências Exatas e da Terra e Engenharias

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto

Prof. Dr. Alexandre Leite dos Santos Silva – Universidade Federal do Piauí
Prof. Dr. Carlos Eduardo Sanches de Andrade – Universidade Federal de Goiás
Prof^a Dr^a Carmen Lúcia Voigt – Universidade Norte do Paraná
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará
Prof. Dr. Juliano Carlo Rufino de Freitas – Universidade Federal de Campina Grande
Prof^a Dr^a Luciana do Nascimento Mendes – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Marcelo Marques – Universidade Estadual de Maringá
Prof^a Dr^a Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba
Prof^a Dr^a Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista

Conselho Técnico Científico

Prof. Me. Abrãao Carvalho Nogueira – Universidade Federal do Espírito Santo
Prof. Me. Adalberto Zorzo – Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza
Prof. Me. Adalto Moreira Braz – Universidade Federal de Goiás
Prof. Dr. Adaylson Wagner Sousa de Vasconcelos – Ordem dos Advogados do Brasil/Seccional Paraíba
Prof. Me. André Flávio Gonçalves Silva – Universidade Federal do Maranhão
Prof^a Dr^a Andreza Lopes – Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento Acadêmico
Prof^a Dr^a Andrezza Miguel da Silva – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia
Prof. Dr. Antonio Hot Pereira de Faria – Polícia Militar de Minas Gerais
Prof^a Ma. Bianca Camargo Martins – UniCesumar
Prof^a Ma. Carolina Shimomura Nanya – Universidade Federal de São Carlos
Prof. Me. Carlos Antônio dos Santos – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Prof. Ma. Cláudia de Araújo Marques – Faculdade de Música do Espírito Santo
Prof^a Dr^a Cláudia Taís Siqueira Cagliari – Centro Universitário Dinâmica das Cataratas
Prof. Me. Daniel da Silva Miranda – Universidade Federal do Pará
Prof^a Ma. Daniela da Silva Rodrigues – Universidade de Brasília
Prof^a Ma. Dayane de Melo Barros – Universidade Federal de Pernambuco
Prof. Me. Douglas Santos Mezacas – Universidade Estadual de Goiás
Prof. Dr. Edwaldo Costa – Marinha do Brasil
Prof. Me. Eduardo Gomes de Oliveira – Faculdades Unificadas Doctum de Cataguases
Prof. Me. Eliel Constantino da Silva – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita
Prof. Me. Euvaldo de Sousa Costa Junior – Prefeitura Municipal de São João do Piauí
Prof^a Ma. Fabiana Coelho Couto Rocha Corrêa – Centro Universitário Estácio Juiz de Fora
Prof. Dr. Fabiano Lemos Pereira – Prefeitura Municipal de Macaé
Prof. Me. Felipe da Costa Negrão – Universidade Federal do Amazonas
Prof^a Dr^a Germana Ponce de Leon Ramírez – Centro Universitário Adventista de São Paulo
Prof. Me. Gevair Campos – Instituto Mineiro de Agropecuária
Prof. Dr. Guilherme Renato Gomes – Universidade Norte do Paraná
Prof. Me. Gustavo Krahl – Universidade do Oeste de Santa Catarina
Prof. Me. Helton Rangel Coutinho Junior – Tribunal de Justiça do Estado do Rio de Janeiro
Prof^a Ma. Jaqueline Oliveira Rezende – Universidade Federal de Uberlândia
Prof. Me. Javier Antonio Albornoz – University of Miami and Miami Dade College
Prof^a Ma. Jéssica Verger Nardeli – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho
Prof. Me. Jhonatan da Silva Lima – Universidade Federal do Pará
Prof. Me. José Luiz Leonardo de Araujo Pimenta – Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria Uruguay
Prof. Me. José Messias Ribeiro Júnior – Instituto Federal de Educação Tecnológica de Pernambuco

Profª Ma. Juliana Thaisa Rodrigues Pacheco – Universidade Estadual de Ponta Grossa
 Profª Drª Kamilly Souza do Vale – Núcleo de Pesquisas Fenomenológicas/UFPA
 Profª Drª Karina de Araújo Dias – Prefeitura Municipal de Florianópolis
 Prof. Dr. Lázaro Castro Silva Nascimento – Laboratório de Fenomenologia & Subjetividade/UFPR
 Prof. Me. Leonardo Tullio – Universidade Estadual de Ponta Grossa
 Profª Ma. Lilian Coelho de Freitas – Instituto Federal do Pará
 Profª Ma. Liliani Aparecida Sereno Fontes de Medeiros – Consórcio CEDERJ
 Profª Drª Lívia do Carmo Silva – Universidade Federal de Goiás
 Prof. Me. Lucio Marques Vieira Souza – Secretaria de Estado da Educação, do Esporte e da Cultura de Sergipe
 Prof. Me. Luis Henrique Almeida Castro – Universidade Federal da Grande Dourados
 Prof. Dr. Luan Vinicius Bernardelli – Universidade Estadual do Paraná
 Prof. Dr. Michel da Costa – Universidade Metropolitana de Santos
 Prof. Dr. Marcelo Máximo Purificação – Fundação Integrada Municipal de Ensino Superior
 Prof. Me. Marcos Aurelio Alves e Silva – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo
 Profª Ma. Marileila Marques Toledo – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri
 Prof. Me. Ricardo Sérgio da Silva – Universidade Federal de Pernambuco
 Prof. Me. Rafael Henrique Silva – Hospital Universitário da Universidade Federal da Grande Dourados
 Profª Ma. Renata Luciane Polsaque Young Blood – UniSecal
 Profª Ma. Solange Aparecida de Souza Monteiro – Instituto Federal de São Paulo
 Prof. Me. Tallys Newton Fernandes de Matos – Faculdade Regional Jaguaribana
 Prof. Dr. Welleson Feitosa Gazel – Universidade Paulista

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)	
A642	<p>A aplicação do conhecimento científico na engenharia civil 3 [recurso eletrônico] / Organizadores Franciele Braga Machado Tullio, Lucio Mauro Braga Machado. – Ponta Grossa, PR: Atena, 2020.</p> <p>Formato: PDF Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader. Modo de acesso: World Wide Web. Inclui bibliografia ISBN 978-65-5706-169-5 DOI 10.22533/at.ed.695200907</p> <p>1. Engenharia civil – Pesquisa – Brasil. 2. Construção civil. I. Tullio, Franciele Braga Machado. II. Machado, Lucio Mauro Braga.</p> <p style="text-align: right;">CDD 338.4769</p>
Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422	

Atena Editora
 Ponta Grossa – Paraná - Brasil
www.atenaeditora.com.br
 contato@atenaeditora.com.br

APRESENTAÇÃO

Em “A Aplicação do Conhecimento Científico na Engenharia Civil 3” trazemos vinte e um capítulos que trazem estudos com boas contribuições para a Engenharia Civil.

Temos vários estudos a respeito da utilização da simulação numérica e computacional na resolução de problemas no projeto e execução de estruturas.

O estudo sobre o comportamento de estruturas utilizando determinados materiais proporciona sua validação como alternativa construtiva. Trazemos também análises a respeito de estruturas submetidas a calor intenso, o que permite otimizar os projetos, considerando situações de incêndio.

Tendo em vista a crescente preocupação com o meio ambiente e a escassez de recursos naturais, torna-se imprescindível os estudos que visem soluções ligadas a otimização na utilização de materiais e desenvolvimento de materiais sustentáveis.

A análise de ferramentas computacionais para o desenvolvimento de projetos de engenharia permite realizar comparativos com a finalidade de subsidiar o projetista a optar por ferramentas mais adequadas e seguras, proporcionando uma melhor qualidade em projetos.

Esperamos que esta coletânea seja útil aos seus estudos. Boa leitura!

Franciele Braga Machado Tullio
Lucio Mauro Braga Machado

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	1
ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DO CONCRETO COM SUBSTITUIÇÃO DO AGREGADO MIÚDO POR RESÍDUO DA SCHEELITA PARA PAVIMENTOS RÍGIDOS	
Manoel Domiciano Dantas Filho Dandara Pereira Moura de Assis Hérculys Guimarães Carvalho Larissa Santana Batista Damião Araújo dos Santos Júnior Jéniffer Paloma da Cruz Leal Nayla Kelly Antunes de Oliveira Adriano Lopes Gualberto Filho Wily Santos Machado Carlos Alexandre da Silva Vieira	
DOI 10.22533/at.ed.6952009071	
CAPÍTULO 2	15
ANÁLISE COMPARATIVA DA ESTABILIDADE GLOBAL DE EDIFICAÇÕES DE CONCRETO ARMADO	
Maurel Dreyer Roberto Domingos Rios	
DOI 10.22533/at.ed.6952009072	
CAPÍTULO 3	32
ANÁLISE DA ESTABILIDADE GLOBAL EM EDIFÍCIOS ALTOS DE CONCRETO ARMADO COM ESTRUTURAS DE LAJES PLANAS	
Camila de Melo Tavares André Felipe de Oliveira Lopes Hildo Augusto Santiago Filho Giuliana Furtado Franca Bono Gustavo Bono	
DOI 10.22533/at.ed.6952009073	
CAPÍTULO 4	48
ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA SÍLICA ATIVA NO DESEMPENHO DO CONCRETO EM SIMULAÇÃO DA AGRESSIVIDADE MARINHA	
André Luiz Louzeiro Carvalho Luciano Carneiro Reis Leandro Almeida Santos Mauricio Cavalcante Cutrim Fonseca Wesley da Cruz Gomes	
DOI 10.22533/at.ed.6952009074	
CAPÍTULO 5	60
ANÁLISE DE MODELOS DE CÁLCULO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO REFORÇADAS AO CISCALHAMENTO COM PRFC	
Daniel Marlon Rodrigues Guedes Ailín Fernández Pérez Paulo Fernando Matos de Santana Luiz Gustavo Dantas Gonçalves Guilherme Sales Soares de Azevedo Melo Marcos Honorato de Oliveira	
DOI 10.22533/at.ed.6952009075	

CAPÍTULO 6	77
ANÁLISE DINÂMICA NA FLAMBAGEM DE UMA COLUNA ESBELTA DE CONCRETO ARMADO COM CRITÉRIOS DA NBR 6118/14	
Alexandre de Macêdo Wahrhaftig Kaique Moreira Matos Magalhães	
DOI 10.22533/at.ed.6952009076	
CAPÍTULO 7	90
ANÁLISE DO COMPORTAMENTO À FLEXÃO DE COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS REFORÇADOS COM TECIDOS ESTRUTURAIS DE FIBRAS DE SISAL	
Sande dos Santos Batista Mariana Santos Nunes Adilson Brito de Arruda Filho Paulo Roberto Lopes Lima Ricardo Fernandes Carvalho José Humberto Teixeira dos Santos Sandro Fábio César	
DOI 10.22533/at.ed.6952009077	
CAPÍTULO 8	99
ANÁLISE ESTRUTURAL E CONSTRUTIVA DA PONTE ESTAIADA DA RODOVIA DO PARQUE – (BR-448)	
Rafael Cariolato Dorneles Paula Manica Lazzari	
DOI 10.22533/at.ed.6952009078	
CAPÍTULO 9	113
ANÁLISE LINEAR E NÃO LINEAR DE UM EDIFÍCIO DE VINTE PAVIMENTOS EM CONCRETO ARMADO	
Fernanda Fonseca Lima Gabriel Rodrigues Gomes Denilda Silva Costa Leonardo Moreira Santana Jaciera Santos Brandão Marcelo Rassy Teixeira	
DOI 10.22533/at.ed.6952009079	
CAPÍTULO 10	125
ANÁLISE LINEAR ELÁSTICA E ANÁLISE NÃO LINEAR FÍSICA DA ESTRUTURA DO EDIFÍCIO DESTINADO À INSTALAÇÃO DE DUAS SEDES ADMINISTRATIVAS DA PREFEITURA DE PARAUAPEBAS APÓS A UTILIZAÇÃO DE REFORÇO PARA REVITALIZAÇÃO DO PRÉDIO	
Denilda Silva Costa Jaciera Santos Brandão Allyson Corrêa Dias Fernanda Fonseca Lima	
DOI 10.22533/at.ed.69520090710	
CAPÍTULO 11	138
ANÁLISE NUMÉRICA COMPARATIVA DE MODELOS APLICÁVEIS AO PROJETO DE LAJES DE CONCRETO	
Edmilson Lira Madureira Eduardo Morais de Medeiros Arthur Leandro de Azevedo Silva Gabriel de Bessa Spinola	
DOI 10.22533/at.ed.69520090711	

CAPÍTULO 12 151

ANÁLISE NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO TERMOMEICÂNICO DE LAJES DE CONCRETO ARMADO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

Andreia Romero Fanton
Luiz Carlos de Almeida
Leandro Mouta Trautwein

DOI 10.22533/at.ed.69520090712

CAPÍTULO 13 164

COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS APROXIMADOS E MÉTODO GERAL DE CÁLCULO DO EFEITO LOCAL DE SEGUNDA ORDEM EM PILARES DE CONCRETO

Wesley de Vasconcelos Rodrigues da Silva
Maria de Lourdes Teixeira Moreira

DOI 10.22533/at.ed.69520090713

CAPÍTULO 14 178

COMPUTER AIDED DESIGN VERSUS BUILDING INFORMATION MODELING: APLICAÇÃO EM PROJETOS DE SISTEMAS PREDIAIS

Jayron Alves Ribeiro Junior
Thainá Maria da Costa Oliveira
Moisés de Araujo Santos Jacinto
Bruna da Costa Silva
Mariana de Sousa Prazeres
Paulo Rafael Nunes e Silva Albuquerque
Leticia Maria Brito Silva
Camilla Gomes Arraiz
Marcos Henrique Costa Coelho Filho
Yara Lopes Machado

DOI 10.22533/at.ed.69520090714

CAPÍTULO 15 187

DESLOCAMENTO VERTICAL DE UMA VIGA DE EULER-BERNOULLI: SIMULAÇÕES NUMÉRICAS SOB A HIPÓTESE DO MÓDULO DE ELASTICIDADE PROBABILÍSTICO

Ana Carolina Carius
Alex Justen Teixeira
João Vitor Curioni de Miranda
Leonardo de Souza Corrêa

DOI 10.22533/at.ed.69520090715

CAPÍTULO 16 204

ESTUDO COMPARATIVO ENTRE O MÉTODO DE ENGESSER-COURBON E MODELOS COMPUTACIONAIS EM PONTES EM VIGAS DE CONCRETO ARMADO

Felipe Gomes da Silva
Maria de Lourdes Teixeira Moreira

DOI 10.22533/at.ed.69520090716

CAPÍTULO 17 217

ESTUDO DE CASO EM BRASÍLIA: EDIFICAÇÃO EM DESACORDO COM NORMAS EXECUTIVAS E DE PROJETO

João da Costa Pantoja
Bruno Camozzi Fedato Faria
Nathaly Sarasty Narváez

DOI 10.22533/at.ed.69520090717

CAPÍTULO 18	235
INFLUÊNCIA DO USO DA TECNOLOGIA BIM NA REDUÇÃO DE MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS NA FASE DE CONCEPÇÃO E PROJETO DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO	
Rafael Azevedo Lino	
Orieta Soto Izquierdo	
Iutah Cristal Dezidério de Veras Barbosa	
DOI 10.22533/at.ed.69520090718	
CAPÍTULO 19	251
ENSAIOS DE PROVA DE CARGA EM ACORDO COM A NBR 9607 (ABNT, 2012): ESTUDO DE CASO	
Clayton Reis de Oliveira	
Armando Lopes Moreno Júnior	
Luis Gustavo Simão de Oliveira	
DOI 10.22533/at.ed.69520090719	
CAPÍTULO 20	269
PERÍCIA EM SISTEMA DE TRATAMENTO DE ESGOTO	
Marcelo de Jesus Rodrigues da Nóbrega	
DOI 10.22533/at.ed.69520090720	
CAPÍTULO 21	278
SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO UTILIZANDO O MODELO DE DANO PLÁSTICO	
Paulo César de Oliveira Júnior	
Jerfson Moura Lima	
Bruno Rodrigues Amorim	
DOI 10.22533/at.ed.69520090721	
SOBRE OS ORGANIZADORES	295
ÍNDICE REMISSIVO	296

ANÁLISE DINÂMICA NA FLAMBAGEM DE UMA COLUNA ESBELTA DE CONCRETO ARMADO COM CRITÉRIOS DA NBR 6118/14

Data de aceite: 01/06/2020

Alexandre de Macêdo Wahrhaftig

Universidade Federal da Bahia, Escola Politécnica, Departamento de Construção e Estruturas,
alixa@ufba.br,

<http://lattes.cnpq.br/7971716903240686>, ORCID:
<http://orcid.org/0000-0002-7144-1917>

Kaique Moreira Matos Magalhães

Universidade Federal da Bahia, Escola Politécnica, Departamento de Construção e Estruturas,
kaique.magalhaes@ufba.br,

<http://lattes.cnpq.br/2970969792768557>, ORCID:
<http://orcid.org/0000-0002-7898-4711>

RESUMO: Avaliou-se, analiticamente, a força crítica de flambagem de uma estrutura real, esbelta, de concreto armado, com variações de geometria ao longo do seu comprimento. Todos os elementos da dinâmica estrutural presentes na análise foram levados em consideração, inclusive o seu peso próprio. As imperfeições construtivas e/ou efeitos de segunda ordem foram linearizadas por meio da parcela negativa da rigidez geométrica, a não linearidade física do concreto foi considerada por meio da redução do produto de rigidez à flexão e o comportamento viscoelástico do concreto foi levado em conta

pelos critérios da fluência da NBR 6118 (ABNT, 2014). Na modelagem matemática utilizou-se um conjunto de molas distribuídas ao longo do comprimento da fundação para representar a ação do solo sobre a estrutura. A força crítica de flambagem foi, então, dinamicamente definida para diferentes instantes ao longo do tempo. Foram encontradas reduções de 70% para o módulo de elasticidade e de 59% para a força crítica de flambagem, em análises realizadas entre zero e quatro mil dias.

PALAVRAS-CHAVE: Força crítica de flambagem, Solução analítica, Fluência, NBR 6118/2014.

DYNAMIC ANALYSIS ON THE BUCKLING OF A REINFORCED CONCRETE COLUMN WITH NBR 6118/14 CRITERIA

ABSTRACT: The critical buckling force of an actual, slender, reinforced concrete structure with variations in geometry along its length was analytically evaluated. All elements of structural dynamics present in the analysis were taken into account, including their own weight. The structural imperfections and/or second order effects were linearized by the negative part of the geometric stiffness. The physical nonlinearity of the concrete was also considered in terms

of reducing the flexural stiffness, and the viscoelastic behavior of concrete was accounted according to the creep criteria of the NBR 6118 (ABNT, 2014). In the mathematical modeling, the ground was modeled as a set of distributed springs along the foundation length. Then, the critical buckling load was dynamically defined to different instants along the time. Reductions of 70% in the modulus of elasticity, and of 59% in the critical buckling load, in analyzes performed between zero and four thousand days, were found.

KEYWORDS: Critical buckling load, Analytical solution, Creep, NBR 6118/2014.

1 | INTRODUÇÃO

De acordo com AWREJCEWICZ (2015) uma coluna representa um elemento estrutural contínuo submetido a forças de compressão axial cujas vibrações são governadas por equações diferenciais parciais (EDP) não lineares. A avaliação da capacidade resistente de uma coluna pode ser realizada de diferentes maneiras. Para elementos esbeltos analisa-se o limite de carregamento pela chamada força crítica de Euler e não apenas por sua capacidade em suportar tensões (UZNY, 2011). Isso quer dizer que uma coluna esbelta atinge o seu Estado Limite Último (ELU), definido pela perda de sua estabilidade, sem haver mesmo alcançado o esgotamento resistente de suas seções transversais, configurado, esse, quer seja por um estado de plastificação ou de ruína propriamente dita.

O primeiro a investigar a força crítica de flambagem foi Euler em 1774, definindo formulações baseadas na Estática, que teve seus estudos complementados por GREENHILL em 1881, que incluiu o peso próprio da coluna. De acordo com TIMOSHENKO (1961) a flambagem de Euler ocorre ainda dentro da região de comportamento elástico do material, sendo definida como o fenômeno em que um elemento estrutural perde o equilíbrio, ou é fletido, sob a ação de uma força axial compressiva suficientemente grande para tirá-lo de sua configuração reta inicial, sendo esse, talvez, o mais conhecido critério de verificação da segurança de uma coluna esbelta. Uma coluna esbelta de concreto armado se caracteriza como um sistema contínuo, submetido a forças axiais de compressão que incluem o seu peso próprio. Esse sistema, do ponto de vista da dinâmica estrutural, pode ser associado a um sistema análogo contendo um único grau de liberdade. Desta forma, o primeiro modo de vibração fica restrito a uma configuração previamente estabelecida mediante uma função matemática que descreve o movimento vibratório e as propriedades dinâmicas de interesse podem ser expressas em função da coordenada generalizada, previa e adequadamente definida na geometria do sistema. RAYLEIGH (1877) aplicou esse conceito ao estudo da vibração de sistemas prismáticos, estabelecendo uma função de forma válida em todo o domínio do problema.

Para casos reais, onde as propriedades dos elementos estruturais variam ao longo do seu comprimento, a formulação desenvolvida para o cálculo das rigidezes e massas devem ser resolvidas observando-se os intervalos definidos na geometria do

sistema. Nesses casos, as integrais obtidas usando o método de RAYLEIGH devem ser resolvidas dentro dos limites estabelecidos para cada segmento, ou seja, as propriedades generalizadas devem ser calculadas para cada segmento da estrutura, conforme definido por sua geometria e somadas ao final.

Esse procedimento deve ser aplicado tanto para o cálculo da frequência quanto para a determinação da força crítica de flambagem, devendo, essa análise, levar em conta todas as parcelas da rigidez estrutural, a saber: a rigidez convencional, que depende do comportamento do material quanto à elasticidade, viscoelasticidade ou mesmo plasticidade; a rigidez geométrica, dependente da força normal atuante na estrutura, e que deve incluir o seu peso próprio (WAHRHAFTIG, 2013a, 2013b, 2016c, 2016d, 2017e); assim como a contribuição do solo, dada pela interação solo-estrutura. É importante destacar que a interação solo-estrutura tem sido uma questão importante no estudo do movimento vibratório de estruturas reais, devido ao fato de que essa interação pode influenciar significativamente no comportamento de um problema de natureza dinâmica (ZUO, 2018).

A estrutura selecionada para este estudo foi um poste esbelto de concreto armado (CA) com 46 metros de comprimento e de geometria variável, para o qual a força crítica de flambagem foi dinamicamente definida. Incluiu-se, para tanto, os efeitos da fluência e da fissuração do concreto, conforme previsões normativas presentes na NBR 6118 (2014), da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), além da não-linearidade geométrica, que foi resolvida por meio da parcela da rigidez geométrica.

2 | DESCRIÇÃO DA ESTRUTURA

A estrutura analisada no presente estudo é um poste esbelto, real, de concreto armado com geometria variável, que tem 46 m de altura, incluindo a superestrutura com 40 m, de seção circular vazada, e a fundação, do tipo tubulão; com base contando com um diâmetro de 140 cm e comprimento de 20 cm, e fuste com diâmetro de 80 cm e comprimento de 580 cm. Seu índice de esbeltez é da ordem de 400. Os módulos de elasticidade para a superestrutura e para a fundação foram calculados conforme a NBR 6118/14 (ABNT, 2014) para resistências características à compressão de 45 MPa e 20 MPa, respectivamente. Um conjunto de antenas e plataforma são, normalmente, instaladas no topo da estrutura para transmissão do sinal de rádio, configurando uma massa concentrada aplicada na extremidade livre da coluna, cuja determinação do valor limite foi a razão da presente investigação. Cabos, escada e guarda-corpo são instalados ao longo de toda a extensão da estrutura, adicionando-lhe uma massa distribuída de 40 kg/m. Os detalhes geométricos da coluna são mostrados na Figura 1, onde g é a aceleração da gravidade; s representa cada segmento estrutural; S , D e th são o tipo de seção, o diâmetro externo e a espessura da parede, respectivamente; d_b representa do

diâmetro das barras de aço; n_b é o número de barras e c' é o cobrimento do concreto.

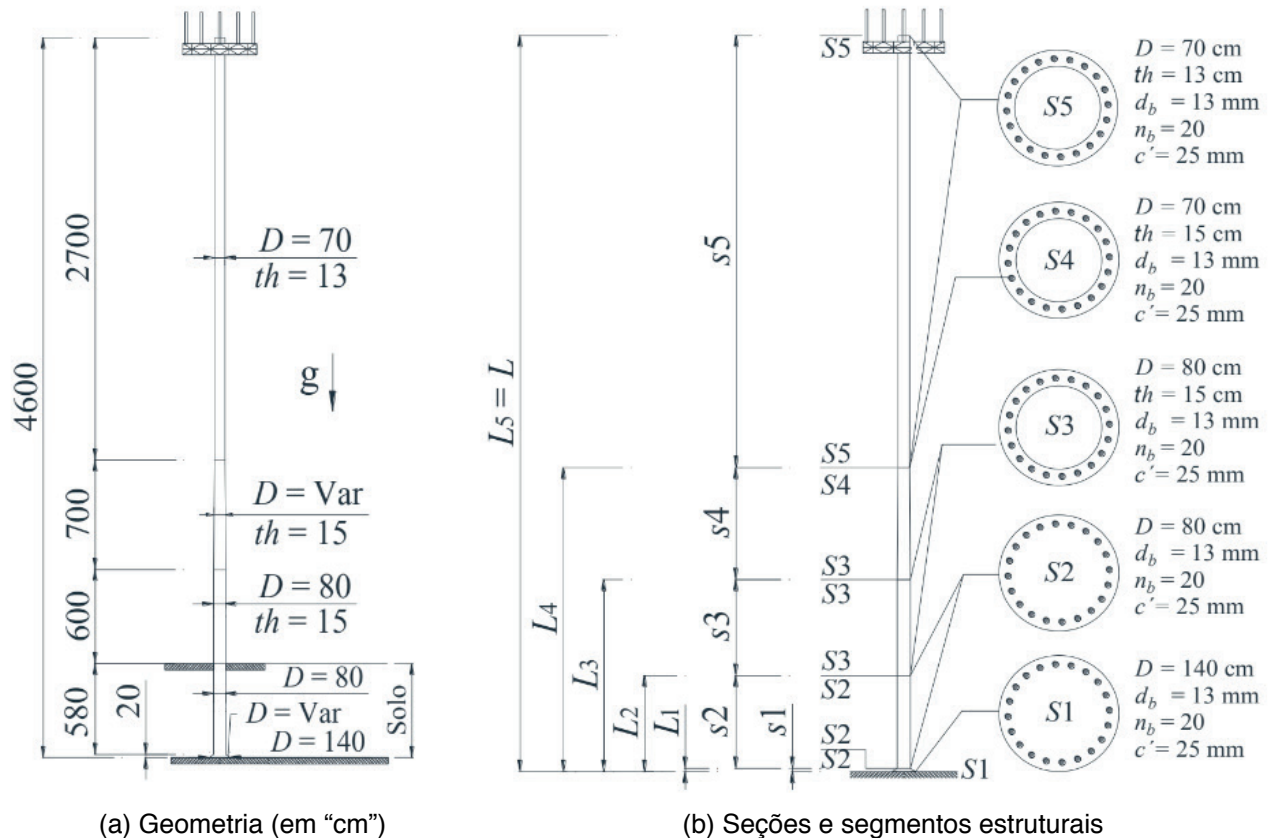


Figura 1. Poste de concreto armado

A ação lateral do solo foi representada por um parâmetro elástico igual a 2668,93 kN/m³ e as densidades do concreto armado foram admitidas como sendo 2600 kg/m³ e 2500 kg/m³ para a superestrutura e para a fundação, respectivamente. As massas e densidades relativas à estrutura estão resumidas na Tabela 1. A não-linearidade física do CA foi computada de acordo com a ABNT (NBR 6118, 2014), que sugere uma redução de 50% no momento de inércia da seção.

Dispositivos	Comprimentos	Densidades/Massas
Superestrutura	6–46 m	2600 kg/m ³
Fundação	0–6 m	2500 kg/m ³
Massa distribuída	6–46 m	40 kg/m
Massa concentrada	46 m	A ser determinada

Tabela 1. Dispositivos na estrutura

A consideração das barras de aço no cálculo do momento de inércia foi realizada pela homogeneização das seções transversais, por meio dos fatores de homogeneização (Fh_s), que multiplicam o momento nominal de inércia da cada seção, sendo obtidos os seguintes valores, respectivamente, para as seções de 1 a 5: $Fh_1 = 1,0199$; $Fh_2 = 1,0568$;

$$Fh_3 = 1,0811; Fh_4 = 1,0671 \text{ e } Fh_5 = 1,0859.$$

3 | CRITÉRIOS DA NBR 6118/14 PARA A FLUÊNCIA DO CONCRETO

O modelo proposto pela NBR 6118/14 (ABNT, 2014) considera que a fluência do concreto ε_{cc} é composta por dois termos, um referente à deformação lenta $\varepsilon_{c,tot}$ e o outro à rápida ε_{cca} . A deformação rápida é irreversível e ocorre durante as primeiras 24 horas após a estrutura ser submetida às forças que a originou. Já a deformação lenta é composta por outras duas parcelas, a deformação lenta irreversível ε_{ccf} e a deformação lenta reversível ε_{ccd} . As equações 1 e 2 apresentam os termos para determinação da fluência do concreto e a deformação lenta, respectivamente.

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{cca} + \varepsilon_{ccf} + \varepsilon_{ccd} \quad (\text{Equação } 1)$$

$$\varepsilon_{c,tot} = \varepsilon_c + \varepsilon_{cc} = \varepsilon_c (1 + \varphi) \quad (\text{Equação } 2)$$

$$\varphi = \varphi_a + \varphi_f + \varphi_d \quad (\text{Equação } 3)$$

onde o coeficiente φ da equação 3 representa a soma dos coeficientes de deformação rápida φ_a , lenta irreversível φ_f e lenta reversível φ_d . A deformação rápida é calculada pela relação entre a resistência do concreto no momento da aplicação da força e sua resistência final. A deformação lenta irreversível é determinada em função da umidade relativa do ambiente, consistência do concreto no lançamento, espessura fictícia da peça e da idade fictícia do concreto no instante de aplicação da força. A deformação lenta reversível depende apenas da duração do carregamento. O seu valor final e o seu desenvolvimento ao longo do tempo são independentes da idade do concreto no momento da aplicação da do carregamento.

A NBR 6118/14 apresenta algumas hipóteses que são adotadas para a determinação dos efeitos de fluência, quando as tensões no concreto são relativas às cargas de serviço. A primeira é a consideração da variação linear entre a tensão aplicada e a deformação por fluência ε_{cc} . Considera-se também que para o mesmo concreto, as curvas de deformação lenta irreversível φ_f em função do tempo, correspondentes às diferentes idades do concreto no momento do carregamento, são obtidas, umas em relação às outras, por deslocamento paralelo ao eixo das deformações, conforme a Figura 2.

Quando se deseja que a determinação da fluência do concreto seja realizada em um determinado instante t , a equação 1 pode ser escrita como uma função do tempo, conforme equação 4, de onde se origina uma função, também temporal, do módulo de elasticidade:

$$\varepsilon_{cc}(t, t_0) = \varepsilon_{cca} + \varepsilon_{ccf} + \varepsilon_{ccd} = \frac{\sigma_c}{E_{c28}} \varphi(t, t_0) \quad (\text{Equação } 4)$$

onde $\varepsilon_{cc}(t, t_0)$ representa a variação no tempo da deformação devido à fluência, σ_c é

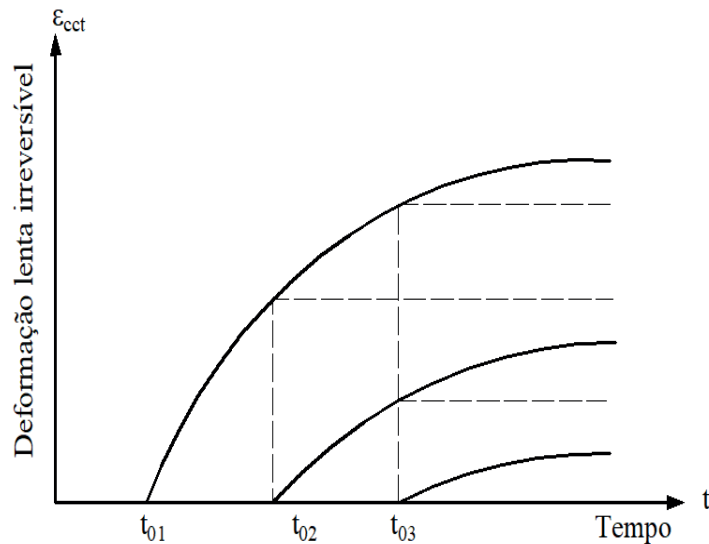


Figura 2. Variação temporal da deformação lenta irreversível (NBR 6118/14).

a tensão no concreto, E_{c28} é o módulo de deformação tangente inicial para 28 dias e $\varphi(t, t_0)$ o coeficiente de fluência em função do tempo, dado pela equação 5:

$$\varphi(t, t_0) = \varphi_a + \varphi_{f\infty} [\beta_f(t) - \beta_f(t_0)] + \varphi_{d\infty} \beta_d \quad (\text{Equação } 5)$$

onde t é a idade fictícia do concreto no instante considerado (em “dias”); t_0 é a idade fictícia do concreto no momento do carregamento (em “dias”), sendo φ_a é calculado pela equação 6; o coeficiente $\varphi_{f\infty}$ é o valor final da deformação lenta dado pela equação 7; $\beta_f(t)$ e $\beta_f(t_0)$ são os coeficientes relativos à deformação lenta irreversível, em função da idade do concreto obtidos pela equação 8; $\varphi_{d\infty}$ é o valor final do coeficiente de deformação lenta reversível que é considerado igual a 0,4 e β_d é o coeficiente relativo à deformação lenta reversível, calculada em função do tempo $(t - t_0)$ decorrido após o carregamento, obtido pela equação 9:

$$\varphi_a = 0,8 \left[1 - \frac{f_c(t_0)}{f_c(t_\infty)} \right] \quad (\text{Equação } 6)$$

$$\varphi_{f\infty} = \varphi_{1c} \varphi_{2c} \quad (\text{Equação } 7)$$

$$\beta_f(t) = \frac{t^2 + At + B}{t^2 + Ct + D} \quad (\text{Equação } 8)$$

$$\beta_d(t) = \frac{t - t_0 + 20}{t - t_0 + 70} \quad (\text{Equação } 9)$$

É de interesse mencionar que relação de $f_c(t_0)$ e $f_c(t_\infty)$ representa a função do

crescimento da resistência do concreto; Q_{1c} é o coeficiente dependente da umidade relativa do ambiente, em porcentagem, e da consistência do concreto e j_{2c} é o coeficiente dependente da espessura fictícia da peça, definido pela equação 10, e os termos A , B , C e D do coeficiente relativo à deformação lenta irreversível são calculados pelas equações 11, 12, 13 e 14, respectivamente:

$$\varphi_{2c} = \frac{42 + h_{fic}}{20 + h_{fic}} \quad (\text{Equação } 10)$$

$$A = 42h^3 - 350h^2 + 588h + 113 \quad (\text{Equação } 11)$$

$$B = 768h^3 - 3060h^2 + 3234h - 23 \quad (\text{Equação } 12)$$

$$C = -200h^3 + 13h^2 + 1090h + 183 \quad (\text{Equação } 13)$$

$$D = 7579h^3 - 31916h^2 + 35343h + 1931 \quad (\text{Equação } 14)$$

onde h_{fic} e h representam a espessura fictícia da peça analisada, em centímetros e metros respectivamente.

4 | SOLUÇÃO DA DINÂMICA ESTRUTURAL PARA A FORÇA CRÍTICA DE FLAMBAGEM

O modelo apresentado na Figura 3 representa uma coluna engastada na base e livre na extremidade superior, em vibração livre, sem amortecimento, onde t indica tempo, s um certo segmento da geometria, $q(t)$ é a coordenada generalizada do problema e $\phi(x)$ representa a forma do movimento vibratório, aproximando um modelo matemático do campo da dinâmica estrutural ao problema prático proposto. A equação 15 se refere a uma função trigonométrica usada como função de forma e considerada válida em todo o domínio da estrutura:

$$\phi(x) = 1 - \cos\left(\frac{\pi x}{2L}\right) \quad (\text{Equação } 15)$$

onde x tem origem na base e L é o comprimento (ou a altura) total da estrutura.

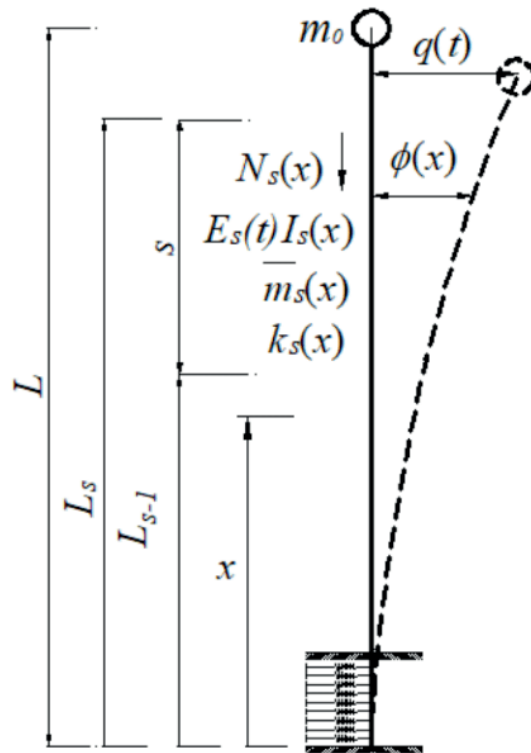


Figura 3. Modelo matemático da dinâmica estrutural

Este modelo representa uma coluna sob a ação de uma força axial de compressão $N(x)$, podendo ter propriedades constantes e variáveis ao longo do seu comprimento. Essas propriedades incluem a geometria, elasticidade ou viscoelasticidade e a densidade. Molas $k_s(x)$ são aplicadas para representar a interação lateral do solo com a estrutura. A coluna está sob a ação de forças gravitacionais, originadas na massa distribuída devido ao peso próprio da estrutura mais escada, cabos e guarda-corpo; e de uma massa concentrada na extremidade livre, a ser definida na iminência da instabilidade, cujo valor representa o limite do carregamento vertical que pode ser aplicado, entendido em termos do peso de antenas, plataforma e suportes.

Para encontrar a solução analítica do problema é necessário considerar a função trigonométrica dada pela equação 14, cuja utilização restringe o problema a um sistema com um único grau de liberdade. O uso da equação 14 como uma função de forma válida para uma estrutura com geometria variável foi validada por Wahrhaftig (2017f) em comparação com análises computacionais pelo método dos elementos finitos. Aplicando o princípio dos trabalhos virtuais e suas derivadas, obtêm-se as propriedades dinâmicas do sistema em questão. A rigidez elástica/viscoelástica convencional é dada por:

$$K_{0s}(t) = \int_{L_{s-1}}^{L_s} E_s(t)I_s(x) \left(\frac{d^2\phi(x)}{dx^2} \right)^2 dx \quad (\text{Equação } 16)$$

$$\text{com } K_0(t) = \sum_{s=1}^n k_{0s}(t) \quad (\text{Equação } 17)$$

onde, para o segmento s da estrutura, $E_s(t)$ é o módulo viscoelástico do material

como função do tempo, $I_s(x)$ é o momento de inércia que varia ao longo do segmento em relação ao movimento considerado, obtido pela interpolação das seções subsequentes, todas homogeneizadas (se for constante será simplesmente I_s), $k_{0s}(t)$ é o termo da variação temporal da rigidez, $K_0(t)$ é a rigidez final variando ao longo do tempo e n é o número total de segmentos existentes na geometria analisada. Se o material tiver comportamento exclusivamente elástico as respectivas equações deixam de ser funções temporais. A rigidez geométrica aparece como uma função da força axial, incluindo a contribuição do peso próprio, sendo expressa por:

$$k_{gs}(m_0) = \int_{L_{s-1}}^{L_s} \left[N_0(m_0) + \sum_{j=s+1}^n N_j + \bar{m}_s(x)(L_s - x)g \right] \left(\frac{d\phi(x)}{dx} \right)^2 dx \quad (\text{Equação } 18)$$

$$\text{com } N_0(m_0) = m_0g \quad (\text{Equação } 19)$$

$$\text{e } K_g(m_0) = \sum_{s=1}^n k_{gs}(m_0) \quad (\text{Equação } 20)$$

onde $k_{gs}(m_0)$ é a rigidez geométrica do segmento s , $N_0(m_0)$ é a força concentrada no topo do sistema, obtida pela equação 19, e $K_g(m_0)$ é a rigidez geométrica total da estrutura, dada pela equação 20, sendo, todos esses, como se vê, dependentes da massa (m_0) localizada na extremidade livre da coluna. Na equação 18, N_j representa a força normal nos segmentos superiores ao segmento considerado, sendo obtida por:

$$N_j = \int_{L_{s-1}}^{L_s} \bar{m}_s(x)g dx \quad (\text{Equação } 21)$$

onde $\bar{m}_s(x)$ é a massa por unidade de comprimento. Assim, a massa generalizada total é encontrada fazendo-se:

$$M(m_0) = m_0 + m \quad (\text{Equação } 22)$$

considerando:

$$m = \sum_{s=1}^n m_s, \text{ com} \quad (\text{Equação } 23)$$

$$m_s = \int_{L_{s-1}}^{L_s} \bar{m}_s(x)(\phi(x))^2 dx \text{ e} \quad (\text{Equação } 24)$$

$$\bar{m}_s(x) = A_s(x)\rho_s \quad (\text{Equação } 25)$$

onde $A_s(x)$ representa a área da seção transversal e ρ_s a densidade do material,

no respectivo segmento s . Se a seção transversal tiver uma área constante ao longo do intervalo, $A_s(x)$ será somente A_s , conseqüentemente, a distribuição de massa por unidade de comprimento será, também, constante. Da mesma forma, se a massa m_0 não variar, todos os outros parâmetros que dependem dela também serão constantes.

Uma abordagem prática para considerar a participação do solo na vibração do sistema é considerá-lo como uma série de molas verticalmente distribuídas ao longo da fundação, que atuam introduzindo uma força restauradora no sistema estrutural. Com $k_s(x)$ denotando o parâmetro de mola, a rigidez efetiva do solo (como uma função da variável x ao longo do comprimento) pode ser definida como:

$$K_{So} = \sum_{s=1}^n k_{so}, \text{ com} \quad (\text{Equação} \quad 26)$$

$$k_{so} = \int_{L_{s-1}}^{L_s} k_s(x) \phi(x)^2 dx \text{ e} \quad (\text{Equação} \quad 27)$$

$$k_s(x) = S_s D_s(x) \quad (\text{Equação} \quad 28)$$

onde o parâmetro K_{So} é uma característica elástica que consiste na soma de $k_s(x)$ ao longo da profundidade da fundação, que dependente de sua geometria $D_s(x)$ e do parâmetro elástico do solo S_s , considerado constante neste caso em cada camada, mas não necessariamente precisa ser. Sendo a força normal positiva, pode-se obter a rigidez total do sistema como uma função de duas variáveis:

$$K(m_0, t) = K_0(t) - K_g(m_0) + K_{So} \quad (\text{Equação} \quad 29)$$

Conseqüentemente, a frequência natural do primeiro modo, como uma função do tempo e da massa concentrada na extremidade livre, pode ser calculada, em Hertz, pela equação 30.

$$f(m_0, t) = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K(m_0, t)}{M(m_0)}} \quad (\text{Equação} \quad 30)$$

O procedimento matemático descrito acima define a força crítica de flambagem para a nulidade da frequência, momento em que a estrutura perde sua rigidez. Todos os parâmetros generalizados, como a rigidez total, equação 29, a massa total, equação 22, assim como a força normal na extremidade livre, equação 20, foram expressos como uma função da massa concentrada. Ao se introduzir a fluência na análise, foi necessário considerar um modelo que representasse o comportamento viscoelástico do concreto, após o que, a frequência se torna uma função temporal, porque o módulo de elasticidade

também o é. Assim sendo, e escrevendo a frequência em termos da massa concentrada no topo e do tempo, equação 30, a força crítica de flambagem é estabelecida para um determinado valor que leva a frequência a se tornar nula, em qualquer instante de interesse, que, obviamente, multiplicada pela aceleração da gravidade, definirá a força correspondente ao colapso do sistema.

Tomando-se as considerações anteriores e servindo-se da massa concentrada como a variável independente do problema, a força crítica de flambagem, N_p pode ser encontrada pelo conceito presente na equação 31:

$$f(m_0, t) = 0 \Rightarrow N_0(m_0) \Big|_{f(m_0, t)=0} = N_f \quad (\text{Equação } 31)$$

A variação da frequência estrutural com a consequente definição da força crítica de flambagem, conforme estabelecido na equação 31, pode ser observada no gráfico da Figura 4. Além dos instantes que foram arbitrariamente escolhidos, a análise poderia ter sido realizada para quaisquer outros momentos de interesse durante a vida útil da estrutura, mas percebe-se haver uma tendência de convergência após decorridos 4000 dias. A Tabela 2 sintetiza os resultados obtidos. Na presente análise foram consideradas as condições padrão de produção do concreto, uma humidade relativa do ar de 70% e uma aceleração da gravidade igual a 9,807 m/s².

Tempo (dia)	Módulo de Elasticidade	N_f	m_0
	(MPa)	(kN)	(kg)
0	34278,92	253,518	25851,64
90	17516,54	149,432	15237,82
1000	11501,91	112,084	11429,39
2000	10736,11	107,329	10944,51
3000	10441,38	105,498	10757,80
4000	10284,57	104,525	10658,58
Variação	70%	59%	

Tabela 2. Resultados obtidos.

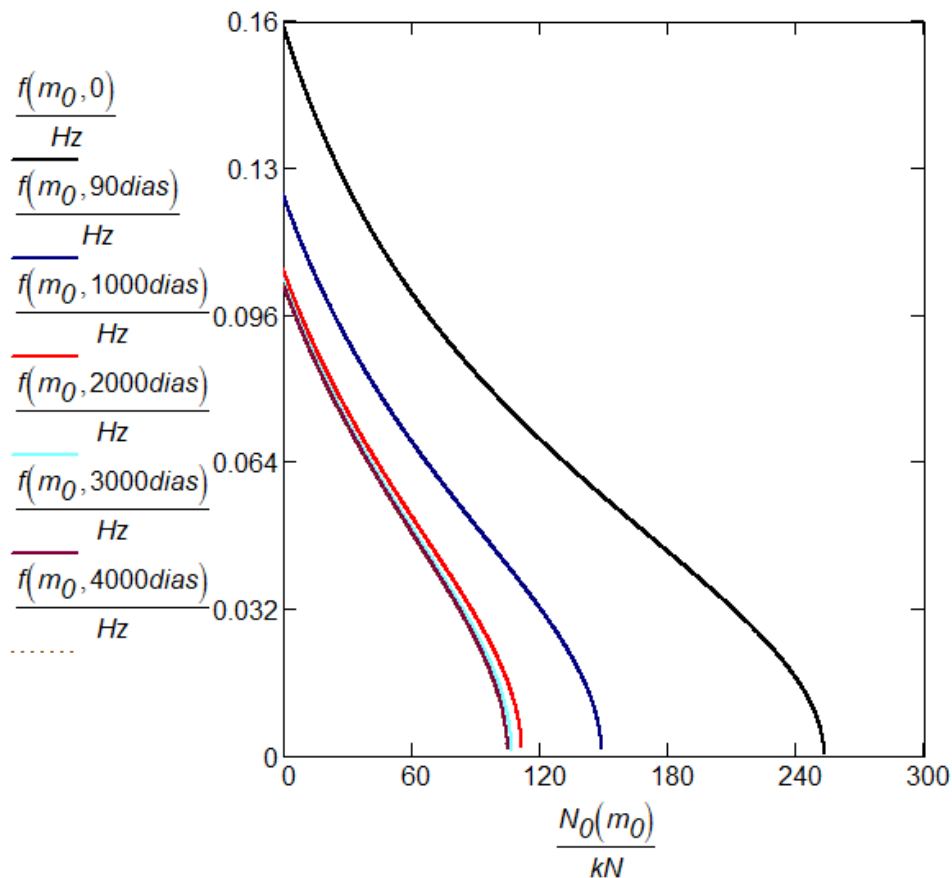


Figura 4. Força crítica de flambagem dinamicamente definida

5 | CONCLUSÃO

Analisou-se a força crítica de flambagem de uma estrutura real de concreto armado por um processo analítico baseado nos conceitos de vibração dos sistemas estruturais. A estrutura analisada apresentava uma variação de geometria ao longo de sua altura, sendo, na análise, considerados todos os parâmetros necessários ao cálculo dinâmico, podendo-se mencionar: as imperfeições geométricas, que foram consideradas por meio da rigidez geométrica; a não linearidade física e a fluência do concreto, que foram levados em conta por meio das recomendações da NBR 6118 (2014) da ABNT.

Com as considerações anteriores presentes no procedimento analítico, a flambagem estrutural foi estabelecida para uma força de compressão de 253,52 kN no instante inicial e de 104,52 kN após decorridos 4000 dias da entrada em serviço da estrutura, ambos os valores correspondendo à nulidade da primeira frequência natural de vibração, o que representa uma redução de 59% na capacidade de carregamento vertical da estrutura. Devido à fluência, o módulo de elasticidade apresentou uma variação de 70% ao longo do período considerado.

Análises comparativas com outros métodos de cálculos e emprego de critérios normativos de outros códigos devem ser incluídas em estudos futuros.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), NBR 6118: **Projeto de estruturas de concreto-procedimento**, 2014.

AWREJCEWICZ J.; KRYSKO A. V.; ZAGNIBORODA N. A.; DOBRIYAN V. V.; KRYSKO V. A.. **On the general theory of chaotic dynamics of flexible curvilinear Euler–Bernoulli beams**. *Nonlinear Dyn* 2015; 79(1): 11–29. DOI: 10.1007/s11071-014-1641-5.

RAYLEIGH. **Theory of sound**. New York: Dover Publications, re-issued; 1877.

TIMOSHENKO S. P.; GERE J. M.. **Theory of elastic stability**. 2nd ed. New York: McGraw-Hill Book Company, 1961.

UZNY S.. **An elastically supported geometrically nonlinear slender system subjected to a specific load in respect of bifurcational load and free vibrations**. *Int J Bifurc Chaos* 2011; 21(10): 2983–2992. DOI:10.1142/S0218127411030295.

WAHRHAFTIG A. M.; BRASIL R. M. L. R. F.; BALHAZAR J. M.. **The first frequency of cantilever bars with geometric effect: a mathematical and experimental evaluation**. *J Brazilian Soc Mech Sci Eng* 2013(a); 35(4): 457–467. DOI:10.1007/s40430-013-0043-9.

WAHRHAFTIG A. M.; **A técnica de discretização em barras comprimidas e as frequências naturais de vibração**, Congreso de Métodos Numéricos en Ingeniería (CMN), Bilbao, España, 2013(b).

WAHRHAFTIG A. M.; BRASIL R. M. L. R. F.. **Representative experimental and computational analysis of the initial resonant frequency of largely deformed cantilevered beams**. *Int J Sol Struct* 2016(c); 102–103: 44–55. DOI:10.1016/j.ijsolstr.2016.10.018.

WAHRHAFTIG, A. M.; BRASIL, R. M. L. R. F.. **Vibration analysis of mobile phone mast system by Rayleigh method**, *Applied Mathematical Modelling* 2016(d); 42: 330-345. DOI:10.1016/j.apm.2016.10.020.

WAHRHAFTIG A. M.; BRASIL R.M.L.R.F.. **Initial undamped resonant frequency of slender structures considering nonlinear geometric effects: the case of a 60.8 m-high mobile phone mast**. *J Brazilian Soc Mech Sci Eng* 2017(e); 39(3): 725–735. DOI: 10.1007/s40430-016-0547-1.

WAHRHAFTIG A. M.. **Analysis of the first modal shape using two case studies**. *Int J Comput Meth* 2017(f); 1840019-1–1840019-14. DOI:10.1142/S0219876218400194.

ZUO H.; BI K.; HAO H.. **Dynamic analyses of operating offshore wind turbines including soil structure interaction**. *Eng Struct* 2018; 157: 42–62. DOI:10.1016/j.engstruct.2017.12.001.

ÍNDICE REMISSIVO

A

Agressividade Marinha 48, 50, 51, 56, 58, 59

Análise Geométrica 114

Análise Não Linear 113, 114, 115, 116, 121, 122, 123, 124, 125, 127, 134, 135, 137

Análise Numérica 138, 149, 151, 163, 294

Argamassa 13, 59, 90, 92, 93, 97, 193

B

BIM 178, 179, 180, 181, 182, 183, 184, 185, 186, 235, 236, 239, 242, 244, 245, 246, 247, 248, 249, 250

C

CC 23, 27, 28, 33, 65, 81, 93, 95, 109, 116, 120, 122, 140, 141, 142, 143, 154, 156, 160, 161, 162, 169, 187, 189, 190, 200, 201, 280, 288, 289, 290, 292

Cisalhamento 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 73, 74, 75, 76, 128, 134, 136, 146, 241, 292, 293, 294

Coeficiente γ_z , 15

Compósitos 62, 74, 90, 91, 92, 94, 95, 96, 98

Concreto 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 20, 22, 30, 31, 32, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 43, 44, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 86, 87, 88, 89, 103, 104, 105, 112, 113, 114, 115, 116, 117, 123, 124, 125, 127, 128, 129, 130, 131, 132, 133, 136, 137, 138, 139, 140, 144, 145, 149, 150, 151, 152, 153, 154, 155, 156, 157, 158, 162, 163, 164, 165, 166, 167, 168, 169, 172, 173, 177, 178, 187, 188, 189, 190, 191, 192, 193, 194, 195, 196, 197, 201, 202, 203, 204, 209, 215, 216, 217, 218, 219, 220, 221, 223, 224, 225, 226, 227, 228, 229, 231, 232, 233, 234, 235, 237, 239, 240, 250, 251, 252, 253, 254, 258, 260, 261, 262, 264, 266, 267, 268, 278, 279, 280, 281, 282, 284, 285, 286, 287, 288, 289, 290, 293, 294

Concreto Armado 15, 16, 17, 18, 20, 22, 30, 31, 32, 35, 47, 60, 61, 62, 64, 66, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 88, 112, 113, 115, 116, 117, 124, 125, 127, 128, 130, 132, 133, 137, 138, 139, 149, 150, 151, 152, 155, 162, 163, 164, 165, 166, 172, 173, 177, 178, 204, 209, 215, 216, 217, 218, 219, 225, 235, 239, 240, 252, 253, 260, 261, 262, 266, 267, 278, 279, 280, 293, 294

Curvatura 115, 164, 165, 166, 167, 168, 169, 170, 171, 175, 176, 177

D

Deslocamento 27, 96, 121, 147, 161, 187, 197, 206

E

Edifícios 15, 16, 17, 20, 30, 31, 32, 33, 35, 47, 113, 114, 116, 119, 124, 126, 127, 128, 129, 136, 137, 177, 183, 239, 240, 272, 274

Efeito 13, 24, 43, 50, 55, 58, 59, 105, 116, 149, 164, 165, 176, 183, 206, 214, 244, 266, 275

Elementos 15, 16, 17, 18, 19, 23, 30, 34, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 43, 44, 60, 77, 78, 84, 96, 101, 103, 114, 115, 116, 122, 125, 127, 130, 136, 137, 138, 139, 141, 142, 144, 146, 147, 148, 149, 150, 151, 152, 153, 154, 156, 157, 158, 162, 163, 179, 181, 182, 184, 187, 189, 190, 197, 199, 200, 202, 203, 205, 208, 209, 213, 215, 217, 219, 220, 222, 223, 230, 231, 233, 238, 239, 241, 242, 243, 254, 258, 261, 262, 266, 267, 278, 279, 280, 285, 287, 288, 289, 293

Engesser-Courbon 204, 205, 206, 207, 212, 213, 215

Estabilidade Global 15, 16, 17, 22, 30, 32, 33, 36, 43, 47, 99, 108, 109, 114, 115, 116

Estais 99, 100, 101, 102, 103, 105, 106, 107, 108, 109, 110, 112

Estocástico 187, 190, 191, 197, 198, 200, 201, 202

Estruturas 15, 16, 17, 18, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 47, 48, 49, 58, 60, 64, 74, 75, 76, 77, 79, 89, 97, 100, 101, 103, 112, 114, 115, 116, 117, 118, 123, 124, 127, 128, 136, 137, 145, 150, 151, 152, 162, 163, 165, 166, 177, 178, 180, 188, 190, 202, 203, 209, 215, 216, 230, 233, 234, 235, 236, 237, 239, 250, 251, 252, 253, 254, 255, 256, 258, 266, 267, 268, 272, 279, 294

F

Fibra 60, 61, 62, 63, 65, 74, 75, 76, 90, 91, 92, 93, 94, 97

Fibra de Sisal 90, 91, 92, 97

Fluência 77, 79, 81, 82, 86, 88, 166

Fogo 151, 152, 153, 157, 162

G

Gestão 3, 150, 178, 179, 183, 186, 269

L

Lajes 17, 18, 20, 21, 24, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 47, 75, 119, 125, 128, 130, 132, 133, 134, 136, 137, 138, 139, 144, 145, 147, 148, 149, 150, 151, 152, 155, 156, 158, 159, 160, 161, 162, 206, 207, 208, 209, 218, 220, 228, 243, 258, 260, 261, 262, 264, 265, 266

Lajes Nervuradas 32, 33, 34, 35, 41

M

Método 5, 9, 20, 29, 52, 62, 64, 67, 68, 69, 72, 79, 84, 104, 114, 116, 127, 130, 138, 139, 143, 144, 149, 150, 156, 164, 165, 166, 167, 168, 169, 171, 172, 173, 174, 175, 176, 177, 181, 187, 189, 190, 191, 197, 199, 200, 202, 203, 204, 205, 206, 207, 208, 209, 210, 212, 213, 214, 215,

216, 238, 239, 240, 249, 252, 279, 283, 287, 293

Método Geral 164, 165, 166, 168, 169, 171, 172, 173, 175, 176, 177

Minerais 2, 4, 13, 193

Modelos 21, 22, 24, 25, 26, 28, 29, 60, 61, 62, 63, 64, 66, 67, 68, 70, 73, 74, 75, 107, 115, 116, 138, 144, 145, 146, 149, 150, 151, 153, 155, 185, 188, 204, 209, 212, 213, 214, 215, 216, 220, 235, 239, 248, 278, 279, 280, 281, 285, 286

Módulo de Elasticidade 17, 77, 81, 86, 87, 88, 140, 166, 187, 188, 189, 190, 191, 192, 193, 194, 195, 196, 197, 198, 201, 202, 203, 282, 286

P

Parâmetro α 15, 25

Pavimento 1, 2, 3, 4, 13, 14, 21, 23, 27, 28, 38, 117, 118, 119, 130, 131, 132, 244, 261

Pilar de Concreto 164, 233

Placas 93, 96, 97, 138, 140, 144, 145, 146

Pontes 99, 100, 101, 103, 106, 107, 111, 112, 204, 205, 208, 209, 210, 213, 215, 216, 253, 258, 268

Potencial de Corrosão 48, 51, 52, 53, 57, 58

PRFC 60, 61, 62, 64, 65, 66, 67, 69, 73, 75, 76

Probabilidade 53, 187, 196, 197, 198, 235

Projetos 15, 100, 111, 120, 128, 138, 139, 178, 179, 180, 181, 182, 183, 184, 185, 186, 189, 217, 218, 220, 224, 226, 232, 233, 235, 238, 239, 240, 242, 243, 244, 245, 246, 249, 250, 258

R

Reforço 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 73, 74, 75, 76, 91, 92, 93, 95, 96, 97, 125, 129, 130, 131, 132, 134, 136, 234, 250, 258, 267, 293

Resíduos 1, 2, 3, 4, 11, 12, 13, 14

Resistência à Compressão 5, 48, 52, 54, 55, 56, 58, 59, 91, 103, 189, 192, 194, 217, 233, 282

Rigidez k 164, 165, 167, 171, 175, 176, 177

S

Sílica Ativa 48, 50, 51, 54, 55, 56, 58, 59, 92, 105

Simulação 48, 50, 51, 52, 56, 58, 59, 138, 155, 156, 157, 203, 278, 280, 281, 287, 288, 289, 290, 291, 292, 293

Sistemas 14, 15, 16, 17, 27, 32, 33, 37, 41, 44, 50, 75, 78, 88, 99, 143, 169, 178, 179, 180, 183, 184, 185, 197, 235, 237, 270, 272, 275, 276, 294, 295

Solução Analítica 77, 84

V

Vazios 7, 12, 48, 53, 56, 58, 59, 224, 227

Viga 42, 61, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 70, 73, 103, 187, 188, 189, 190, 191, 197, 198, 200, 201, 202, 203, 206, 208, 213, 214, 222, 223, 224, 225, 226, 227, 228, 233, 241, 245, 248, 263, 264, 266, 278, 280, 285, 287, 288, 289, 290, 291, 292, 293

 **Atena**
Editora

2 0 2 0