



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

**Atena**  
Editora

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<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> 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<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> 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<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> 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<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Andreza Lopes – Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento Acadêmico  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Andrezza Miguel da Silva – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia  
Prof. Dr. Antonio Hot Pereira de Faria – Polícia Militar de Minas Gerais  
Prof<sup>a</sup> Ma. Bianca Camargo Martins – UniCesumar  
Prof<sup>a</sup> 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<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Cláudia Taís Siqueira Cagliari – Centro Universitário Dinâmica das Cataratas  
Prof. Me. Daniel da Silva Miranda – Universidade Federal do Pará  
Prof<sup>a</sup> Ma. Daniela da Silva Rodrigues – Universidade de Brasília  
Prof<sup>a</sup> 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<sup>a</sup> 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<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> 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<sup>a</sup> Ma. Jaqueline Oliveira Rezende – Universidade Federal de Uberlândia  
Prof. Me. Javier Antonio Albornoz – University of Miami and Miami Dade College  
Prof<sup>a</sup> 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

<b>Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)</b>	
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>
<b>Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422</b>	

Atena Editora  
 Ponta Grossa – Paraná - Brasil  
[www.atenaeditora.com.br](http://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

<b>CAPÍTULO 1</b> .....	<b>1</b>
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	
<b>DOI 10.22533/at.ed.6952009071</b>	
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	<b>15</b>
ANÁLISE COMPARATIVA DA ESTABILIDADE GLOBAL DE EDIFICAÇÕES DE CONCRETO ARMADO	
Maurel Dreyer Roberto Domingos Rios	
<b>DOI 10.22533/at.ed.6952009072</b>	
<b>CAPÍTULO 3</b> .....	<b>32</b>
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	
<b>DOI 10.22533/at.ed.6952009073</b>	
<b>CAPÍTULO 4</b> .....	<b>48</b>
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	
<b>DOI 10.22533/at.ed.6952009074</b>	
<b>CAPÍTULO 5</b> .....	<b>60</b>
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	
<b>DOI 10.22533/at.ed.6952009075</b>	



**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 TERMOMECAÂNICO 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**

<b>CAPÍTULO 18</b> .....	<b>235</b>
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	
<b>DOI 10.22533/at.ed.69520090718</b>	
<b>CAPÍTULO 19</b> .....	<b>251</b>
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	
<b>DOI 10.22533/at.ed.69520090719</b>	
<b>CAPÍTULO 20</b> .....	<b>269</b>
PERÍCIA EM SISTEMA DE TRATAMENTO DE ESGOTO	
Marcelo de Jesus Rodrigues da Nóbrega	
<b>DOI 10.22533/at.ed.69520090720</b>	
<b>CAPÍTULO 21</b> .....	<b>278</b>
SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO UTILIZANDO O MODELO DE DANO PLÁSTICO	
Paulo César de Oliveira Júnior	
Jerfson Moura Lima	
Bruno Rodrigues Amorim	
<b>DOI 10.22533/at.ed.69520090721</b>	
<b>SOBRE OS ORGANIZADORES</b> .....	<b>295</b>
<b>ÍNDICE REMISSIVO</b> .....	<b>296</b>

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

*Data de aceite: 01/06/2020*

*Data de submissão: 01/04/2020*

**Wesley de Vasconcelos Rodrigues da Silva**

Universidade Federal do Piauí

Teresina – PI

<http://lattes.cnpq.br/4136223250304052>

**Maria de Lourdes Teixeira Moreira**

Universidade Federal do Piauí

Teresina – PI

<http://lattes.cnpq.br/1178823116168764>

**RESUMO:** Este trabalho compara os métodos aproximados e o método geral de cálculo do efeito local de segunda ordem em pilares de concreto armado, segundo a NBR 6118. Por serem simplificados, o método do pilar-padrão com curvatura aproximada e o método do pilar-padrão com rigidez  $k$  aproximada são muitas vezes escolhidos para o cálculo dos esforços solicitantes em pilares medianamente esbeltos. Por outro lado, o método geral apresenta resultados mais precisos, embora seja mais complexo. Uma planilha de cálculo criada pelos autores e o programa P-Calc foram utilizados para determinação das solicitações pelos métodos aproximados e geral, variando

o esforço normal e o índice de esbeltez. Foi observado que a intensidade do momento total solicitante de cálculo aumentou conforme cresceu o esforço normal e o índice de esbeltez e ainda que o método do pilar-padrão com rigidez  $k$  aproximada apresentou resultados mais próximos ao método geral do que o método do pilar-padrão com curvatura aproximada, embora ambos estejam a favor da segurança na maioria dos casos.

**PALAVRAS-CHAVE:** Pilar de concreto, Efeito local de segunda ordem, Curvatura aproximada, Rigidez  $k$  aproximada, Método Geral.

### COMPARISON BETWEEN APPROXIMATE METHODS AND GENERAL METHOD OF CALCULATING LOCAL SECOND-ORDER EFFECTS IN CONCRETE COLUMNS

**ABSTRACT:** This work compares the approximate methods and the general method of calculating local second-order effects in reinforced concrete columns, according to NBR 6118. Once they are simplified, the standard-column method with approximate curvature and the standard-column method with approximate  $k$  stiffness are often chosen to calculate the requested efforts in averagely slender columns.



On the other hand, the general method provides more accurate results, although it is more complex. A calculation sheet created by the authors and the software P-Calc were used to determine the calculation requests by the approximate and the general methods, varying the normal effort and the slenderness index. It was observed that the intensity of the total bending moment requested increased as the normal effort and the slenderness index increased and also that the standard-column method with approximate  $k$  stiffness provides results closer to the general method than the standard-column method with approximate curvature, although both are in favour of safety in most cases.

**KEYWORDS:** Concrete column, Local second-order effect, Approximate curvature, Approximate  $k$  stiffness, General method.

## 1 | INTRODUÇÃO

A NBR 6118 estabelece diversos métodos para o cálculo do efeito local de segunda ordem em pilares de concreto armado, entre eles, o método geral, o método do pilar-padrão com curvatura aproximada e o método do pilar-padrão com rigidez  $k$  aproximada. A possibilidade de uso dos métodos depende do índice de esbeltez, o qual avalia a relevância dos efeitos locais de segunda ordem para o pilar. Devido à maior simplicidade na concepção e aplicação, os métodos aproximados são frequentemente utilizados por projetistas quando se deseja calcular as solicitações em pilares sem o auxílio de métodos computacionais, seja com fins didáticos ou apenas para rápida verificação.

O objetivo deste trabalho é comparar o método do pilar-padrão com curvatura aproximada e o método do pilar-padrão com rigidez  $k$  aproximada com o método geral, a fim de avaliar se os resultados obtidos com os métodos aproximados são suficientemente semelhantes aos alcançados com a aplicação do método geral e até mesmo apontar qual dos métodos aproximados apresenta resultados mais próximos ao método geral para cálculo dos efeitos locais de segunda ordem em pilares de concreto armado.

## 2 | EFEITOS LOCAIS DE SEGUNDA ORDEM

No dimensionamento de pilares de concreto armado, sem dúvida uma etapa fundamental é a determinação das solicitações atuantes, as quais podem ser de primeira ou segunda ordem. Os esforços calculados a partir da geometria indeformada de uma estrutura são chamados esforços de primeira ordem. Já os esforços que são acrescentados aos de primeira ordem quando o equilíbrio da estrutura é estudado na configuração deformada são chamados esforços de segunda ordem.

De acordo com Carvalho e Pinheiro (2013), a ação dos carregamentos verticais e horizontais faz os nós das estruturas deslocarem horizontalmente, o que provoca novos esforços. São os chamados efeitos globais de segunda ordem. É possível ainda que

os eixos das barras da estrutura não se mantenham retilíneos devido ao carregamento. Nesse caso, fala-se em efeitos locais de segunda ordem, os quais afetam principalmente os esforços solicitantes ao longo da própria barra. Em pilares-parede, é possível que uma região apresente falta de retilineidade mais acentuada que o pilar ao todo, onde surgem efeitos de segunda ordem maiores, os efeitos localizados de segunda ordem.

Na determinação dos efeitos de segunda ordem é imprescindível a consideração da não-linearidade geométrica (NLG) e da não-linearidade física (NLF) das estruturas. A não-linearidade geométrica decorre do fato de os esforços solicitantes e as tensões atuantes serem afetados pelo estado de deformação da estrutura, isto é, não há uma relação linear entre carregamentos atuantes e deformações, assim não é possível aplicar a superposição de efeitos quando a mudança de geometria é relevante. Já a não-linearidade física é resultado de uma combinação de várias características do concreto armado, como escoamento da armadura, fissuração e plastificação do concreto, fluência, entre outras, tendo como principal consequência prática a alteração do módulo de elasticidade do concreto armado devido à deformação (MONCAYO, 2011).

Tendo em vista a dificuldade imposta pela complexidade de aplicação do método geral na determinação de solicitações em pilares, o qual considera a não-linearidade geométrica e a não linearidade física de maneira rigorosa, a NBR 6118 aceita que métodos aproximados sejam utilizados para os casos de pilares medianamente esbeltos, por apresentarem efeitos locais de segunda ordem não tão relevantes. Esses métodos partem de simplificações da NLG e da NLF para estabelecer expressões de cálculo dos esforços.

### 3 | MÉTODO DO PILAR-PADRÃO COM CURVATURA APROXIMADA

Segundo a NBR 6118, esse método aproximado é aplicável apenas a pilares com índice de esbeltez menor ou igual a 90, seção retangular constante ao longo do eixo e armadura simétrica e constante. A não-linearidade geométrica é considerada de maneira aproximada, assumindo que a curva de deformação do pilar pode ser interpretada como uma função senoidal. A não-linearidade física é levada em conta por meio de uma expressão aproximada da curvatura da seção crítica, avaliada pela expressão (ABNT, 2014):

$$\frac{1}{r} = \frac{0,005}{h(\nu + 0,5)} \leq \frac{0,005}{h} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

$1/r$  é a curvatura da seção crítica;

$h$  é a altura da seção do pilar na direção considerada; e

$\nu$  (ní) é a forma adimensional da força normal, dada por:

$$v = \frac{N_d}{A_c f_{cd}} \quad (\text{Equação 2})$$

Com:

$N_d$  sendo o esforço normal de cálculo;

$A_c$  sendo a área da seção de concreto constante ao longo do eixo; e

$f_{cd}$  sendo a resistência de cálculo do concreto à compressão.

De acordo com a NBR 6118, o momento total máximo  $M_{d,tot}$  é calculado pela expressão a seguir e seu valor deve ser superior ao momento mínimo de primeira ordem  $M_{1d,min}$  e ao momento de primeira ordem  $M_{1d,A}$  (ABNT, 2014):

$$M_{d,tot} = \alpha_b M_{1d,A} + N_d \frac{l_e^2}{10} \frac{1}{r} \geq \begin{cases} M_{1d,min} \\ M_{1d,A} \end{cases} \quad (\text{Equação 3})$$

Onde:

$\alpha_b$  é o coeficiente apresentado no item 4.2.5.2;

$N_d$  é o esforço normal de cálculo;

$l_e$  é o comprimento equivalente; e

$1/r$  é a curvatura da seção crítica.

A primeira parcela da expressão de  $M_{d,tot}$  corresponde ao esforço de primeira ordem e a segunda ao esforço de segunda ordem no pilar. A excentricidade de segunda ordem  $e_2$  fica então definida por:

$$e_2 = \frac{l_e^2}{10} \frac{1}{r} = \frac{l_e^2}{10} \frac{0,005}{h(v + 0,5)} \quad (\text{Equação 4})$$

#### 4 | MÉTODO DO PILAR-PADRÃO COM RIGIDEZ K APROXIMADA

Esse método aproximado também é aplicável apenas a pilares com índice de esbeltez menor ou igual a 90, seção retangular constante ao longo do eixo e armadura simétrica e constante. Da mesma forma que o método aproximado anterior, a não-linearidade geométrica é considerada de maneira aproximada, admitindo que a deformação do pilar seja definida por uma curva senoidal. Já a não-linearidade física é considerada por meio de uma expressão aproximada da rigidez (ABNT, 2014).

De acordo com a NBR 6118, o momento total máximo  $M_{d,tot}$  deve ser maior que o momento mínimo de primeira ordem  $M_{1d,min}$  (calculado na seção anterior) e tem seu valor obtido por meio da majoração do momento de primeira ordem  $M_{1d,A}$  (ABNT, 2014):

$$M_{d,tot} = \frac{\alpha_b M_{1d,A}}{1 - \frac{\lambda^2}{120 \kappa/\nu}} \geq \begin{cases} M_{1d,min} \\ M_{1d,A} \end{cases} \quad (\text{Equação 5})$$

Onde  $k$  (kapa) é a rigidez adimensional, de valor aproximadamente:

$$\kappa = 32 \left( 1 + 5 \frac{M_{d,tot}}{h N_d} \right) \nu \quad (\text{Equação 6})$$

Nota-se que o momento total  $M_{d,tot}$  a ser calculado também aparece na expressão de  $k$ , desta forma, é necessário recorrer a um cálculo iterativo para solucionar o problema. A NBR 6118 afirma que são suficientes apenas duas ou três iterações para que o valor de  $M_{d,tot}$  possa convergir (ABNT, 2014).

De acordo com Banki (2004), o processo iterativo nem sempre precisa ser adotado. É possível uma abordagem direta, pois a variável a ser encontrada aparece em funções polinomiais, resolvidas substituindo-se uma equação na outra e reorganizando os termos em uma equação do segundo grau. A NBR 6118 apresenta a equação e os seus coeficientes (ABNT, 2014):

$$A \cdot M_{d,tot}^2 + B \cdot M_{d,tot} + C = 0 \quad (\text{Equação 7})$$

$$\begin{cases} A = 5h \\ B = h^2 N_d - \frac{N_d l_e^2}{320} - 5h \alpha_b M_{1d,A} \\ C = -N_d h^2 \alpha_b M_{1d,A} \end{cases} \quad (\text{Equação 8})$$

O esforço de segunda ordem (acréscimo de momento fletor) pode ser explicitado pela subtração entre o momento total máximo  $M_{d,tot}$  e o momento de primeira ordem  $M_{1d,A}$ . Dividindo-se esse resultado pelo esforço normal de cálculo  $N_d$ , encontramos a excentricidade de segunda ordem  $e_2$ :

$$e_2 = \frac{M_{d,tot} - \alpha_b M_{1d,A}}{N_d} \quad (\text{Equação 9})$$

## 5 | MÉTODO GERAL

Conforme a NBR 6118, o método geral de determinação dos esforços de segunda ordem é uma análise não-linear, executada com a discretização da barra em quantidade suficiente de segmentos para considerar a relação momento-curvatura real em cada seção (não-linearidade física e não-linearidade geométrica) de modo rigoroso.

Esse método é aplicável a pilares de quaisquer índices de esbeltez, desde que seja respeitado o limite de esbeltez de 200, imposto para pilares de concreto pela norma, logo



esse método é o único aceito para pilares com índice de esbeltez maior que 140, sendo também o método mais preciso (ABNT, 2014).

Diferente dos métodos anteriores, não existe qualquer restrição quanto às características do pilar, podendo ser aplicado inclusive a pilares com esforço lateral, com armadura não constante ao longo da barra ou com variação da área de concreto ao longo das seções. A seção do pilar pode ainda ter formato diferente do retangular. Trata-se de um método de verificação, sendo necessário o conhecimento da armadura existente.

Segundo Scadelai (2004), a aplicação do método geral envolve a resolução de sistemas de equações diferenciais para as quais nem sempre é possível encontrar uma solução diretamente. Daí faz-se necessária a aplicação de processos de cálculo iterativo, o que apesar de aceitar algumas simplificações, ainda requer significativo esforço de cálculo, tornando comum a utilização de softwares específicos para determinação dos esforços de segunda ordem.

Borges (1999) afirma que o método geral consiste em determinar o diagrama carga versus deslocamento do pilar por meio da aplicação sucessiva do método do equilíbrio, conforme aumenta a deformação do pilar e faz duas considerações relacionadas ao seu rigor: (a) admitir a curvatura como segunda derivada da equação da linha elástica e (b) ter sua precisão intimamente relacionada ao número de subdivisões da peça.

No procedimento de cálculo pela excentricidade progressiva, o esforço normal é fixado, enquanto o momento fletor atuante é afetado pelo incremento progressivo da excentricidade no topo do pilar (ver figura 1) até que sejam atingidos valores críticos de deslocamento, obtendo assim a excentricidade crítica.

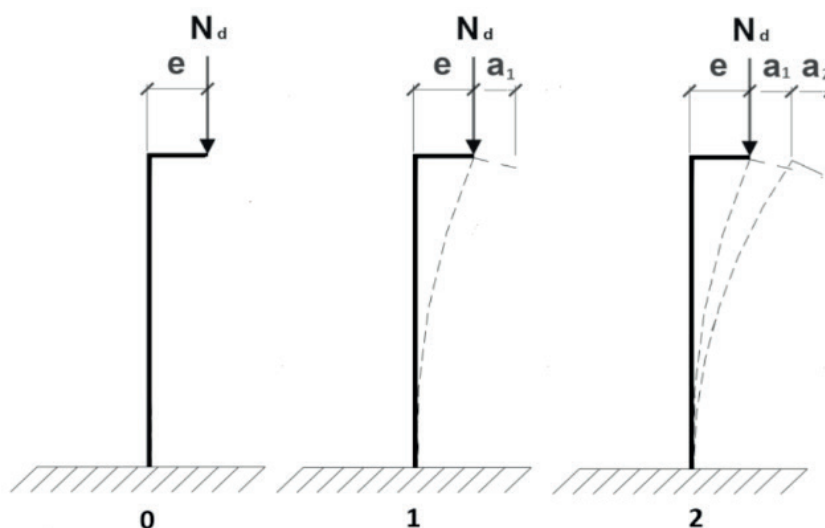


Figura 1: Aumento da excentricidade a cada iteração.

Fonte: Autores.

O método geral usa a relação momento fletor-curvatura real em cada seção, dessa forma se faz necessário obter o diagrama  $N$ ,  $M$ ,  $1/r$  ou, em termos adimensionais, o diagrama  $\mu$ ,  $v$ ,  $h/r$ , específico para cada caso de pilar a ser analisado (ver figura 2) ou

para cada seção do pilar, caso as características do pilar, como dimensões da seção, área e distribuição da armadura, variem ao longo do eixo.

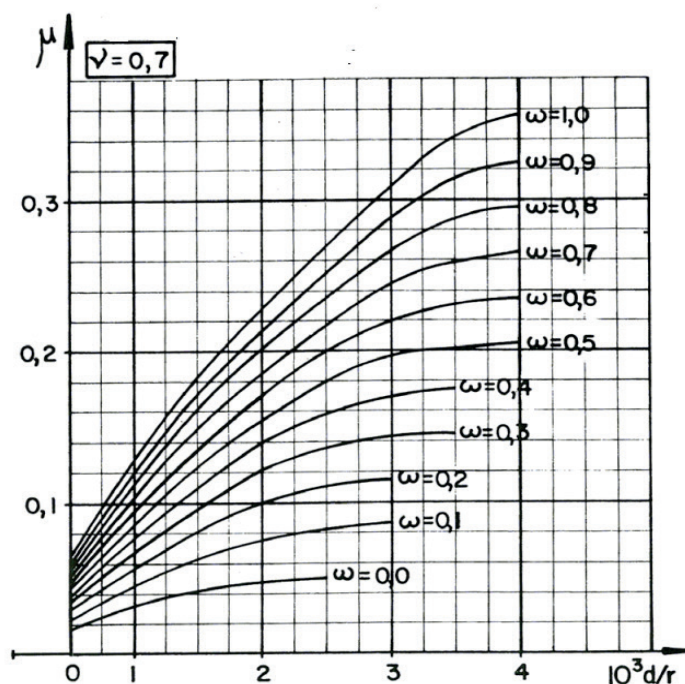


Figura 2: Diagrama M, N, 1/r.

Fonte: Scadelai (2014).

A curvatura está associada às deformações do pilar, e estas se relacionam às tensões atuantes por meio de equações constitutivas. Sendo conhecidas as tensões, a deformação e a curvatura é possível calcular o esforço normal e o momento fletor para cada valor de curvatura, obtendo grupos de valores (M, N, 1/r) interligados, ao qual se dá o nome diagrama M, N, 1/r. Geralmente recorre-se ao auxílio computacional para sua elaboração. (BORGES, 1999).

Bacarji (1993 apud Scadelai, 2004) formulou um roteiro para verificação de um pilar cuja flecha não é conhecida (ver Figura 3) e nem a expressão  $y = f(x)$  da deformada, a ser resolvida por tentativas.

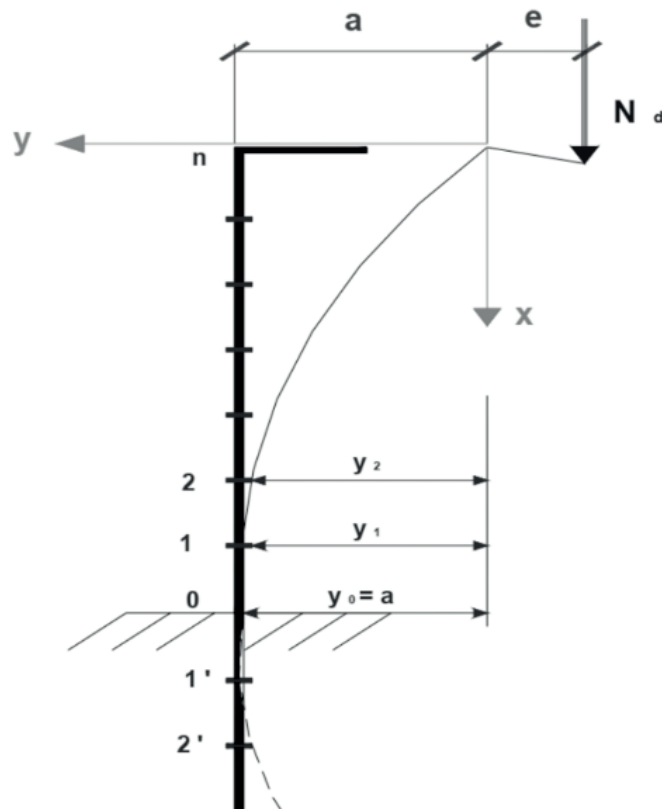


Figura 3: Divisão do pilar em sucessivos segmentos para cálculo das flechas.

Fonte: Scadelai (2014).

De maneira resumida, pode-se dizer que o processo arbitra o valor da flecha inicial, calcula o momento de primeira e segunda ordem para aquela seção e, com isso, determina o valor da flecha da próxima seção, repedindo esse procedimento seção por seção até que se atinja o topo, onde deve ser verificada a flecha de valor zero (origem do sistema de coordenadas), caso contrário, todo o processo deve ser reiniciado com novo valor arbitrado para flecha na base, o que mostra a dificuldade de aplicação do método geral sem o uso de ferramentas computacionais.

## 6 | METODOLOGIA

Para o cálculo do momento total solicitante pelos métodos aproximados, este trabalho elaborou e utilizou uma planilha eletrônica no aplicativo Microsoft Office Excel (ver figura 4), utilizando a equação 3 para o método do pilar-padrão com curvatura aproximada e as equações 7 e 8 para o método do pilar-padrão com rigidez  $k$  aproximada.

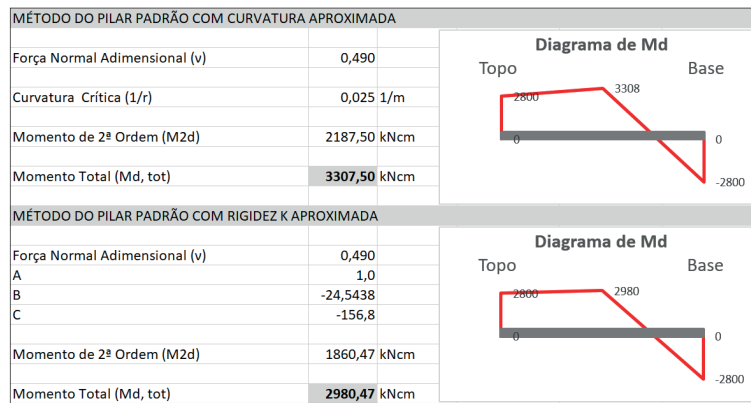


Figura 4: Planilha de cálculo pelos métodos aproximados.

Fonte: Autores.

A determinação do momento total solicitante de cálculo pelo método geral foi feita com o auxílio do software *P-Calc* (ver figura 5), aplicativo para análise de pilares de concreto armado submetidos à flexo-compressão normal ou oblíqua, desenvolvido por Sander David Cardoso Junior em estudo apresentado ao programa de educação continuada da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. O aplicativo está disponível gratuitamente no site da TQS <<https://store.tqs.com.br/apps/calculators>>, na versão 1.4.0.

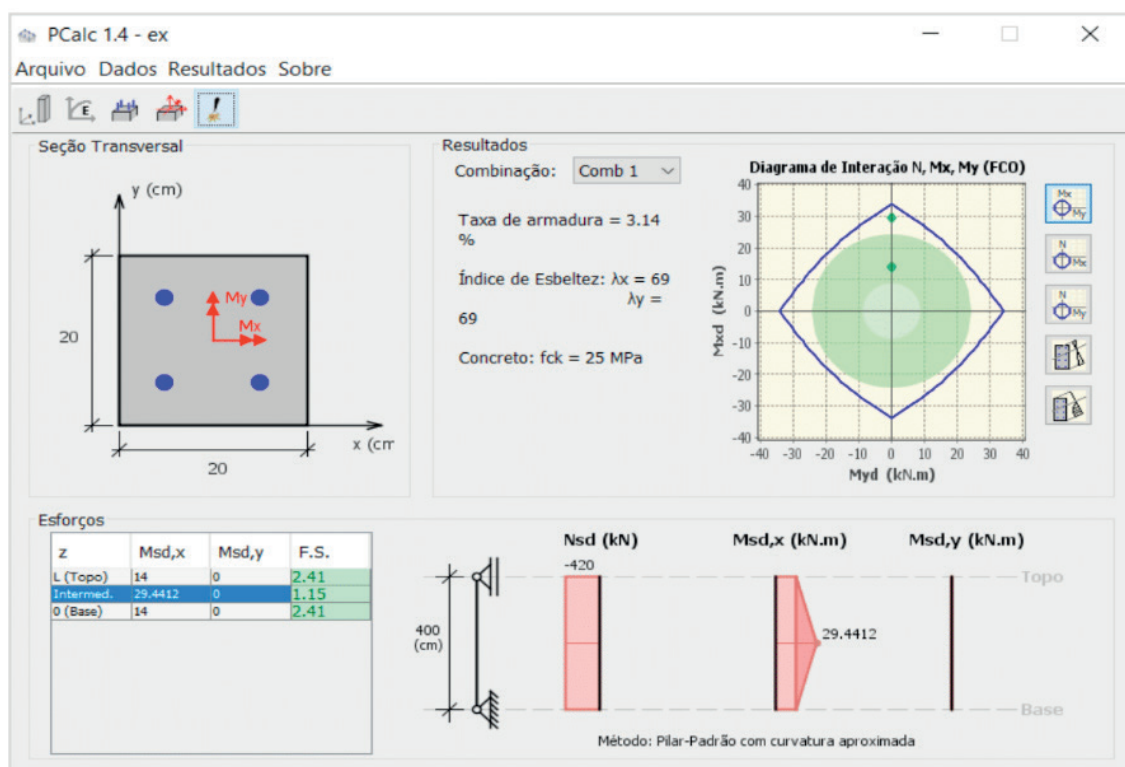


Figura 5: Tela de resultados do software P-Calc.

Fonte: Autores.

Foram definidos os seguintes parâmetros de cálculo do pilar a serem usados nos três métodos de cálculo do momento total solicitante:



- Pilar birrotulado, em concreto armado classe C25 e aço CA-50;
- A seção do pilar adotada foi retangular 20 cm x 20 cm;
- O índice de esbeltez sofreu variação mudando-se o comprimento do pilar;
- A armadura escolhida foi de 4 barras de  $\varnothing$  20,0 mm, (taxa de armadura 4%);
- O pilar foi submetido à flexo-compressão reta, com momentos iniciais no topo e na base tracionando a mesma face do pilar;
- O coeficiente de majoração das ações no ELU adotado foi 1,4 para todas as ações e os coeficientes de minoração das resistências do concreto e do aço foram 1,4 e 1,15, respectivamente.

Para comparar a evolução do momento total de cálculo pelos três métodos, o índice de esbeltez foi alterado entre 35 e 90, em intervalos de 5 em 5, mudando apenas o comprimento equivalente do pilar, sem que fosse modificada a seção, para valores de esforço normal característico baixo, moderado e alto (100kN, 200kN e 300kN) e para valores de momentos iniciais característicos leve, médio e acentuado (5kNm, 10kNm e 20kNm), totalizando assim 9 situações, de E1 a E9, conforme tabela 1.

Momento Inicial Mk	Esforço Normal Nk		
	100kN	200kN	300kN
5kNm	E1	E2	E3
10kNm	E4	E5	E6
20kNm	E7	E8	E9

Tabela 1: Situações de cálculo variando esbeltez.

Fonte: Autores.

## 7 | RESULTADOS

As tabelas 2, 3 e 4 a seguir mostram o valor do momento total de cálculo obtido pelos três métodos, para as 9 situações, variando o índice de esbeltez. Conforme foi dito anteriormente, o método geral é um método de verificação, dessa forma, o software P-Calc apontou que em alguns casos o pilar não resistiu às solicitações. Esses valores aparecem em negrito. As situações E1, E2, E3 e E4 não apresentaram essa condição em nenhum dos casos.

Mk	$\lambda$	Esforço normal Nk = 100 kN						Esforço normal Nk = 200 kN						Esforço normal Nk = 300 kN					
		Geral		Curvatura		Rigidez k		Geral		Curvatura		Rigidez k		Geral		Curvatura		Rigidez k	
5	35	7,39	8,43	14%	8,05	9%	7,74	9,86	27%	8,55	10%	8,01	10,94	37%	8,85	10%			
5	40	7,51	8,87	18%	8,40	12%	7,99	10,73	34%	9,09	14%	8,37	12,15	45%	9,53	14%			
5	45	7,66	9,36	22%	8,81	15%	8,29	11,73	41%	9,75	18%	8,81	13,51	53%	10,38	18%			
5	50	7,83	9,92	27%	9,27	18%	8,65	12,83	48%	10,53	22%	9,35	15,04	61%	11,43	22%			
5	55	8,02	10,53	31%	9,81	22%	9,09	14,06	55%	11,46	26%	10,02	16,73	67%	12,70	27%			
5	60	8,24	11,20	36%	10,41	26%	9,60	15,40	60%	12,55	31%	10,84	18,58	71%	14,22	31%			
5	65	8,50	11,93	40%	11,09	31%	10,22	16,86	65%	13,80	35%	11,89	20,59	73%	16,02	35%			
5	70	8,79	12,72	45%	11,85	35%	10,97	18,43	68%	15,24	39%	13,22	22,76	72%	18,13	37%			
5	75	9,12	13,56	49%	12,69	39%	11,89	20,13	69%	16,86	42%	14,98	25,10	68%	20,54	37%			
5	80	9,49	14,47	52%	13,61	43%	13,03	21,93	68%	18,67	43%	17,39	27,59	59%	23,26	34%			
5	85	9,92	15,43	56%	14,62	47%	14,47	23,86	65%	20,67	43%	20,83	30,24	45%	26,28	26%			
5	90	10,42	16,45	58%	15,71	51%	16,34	25,90	59%	22,86	40%	26,12	33,06	27%	29,61	13%			

Tabela 2: Momento total solicitante de cálculo (kNm) para situações E1, E2 e E3

Fonte: Autores.

Mk	$\lambda$	Esforço normal Nk = 100 kN						Esforço normal Nk = 200 kN						Esforço normal Nk = 300 kN					
		Geral		Curvatura		Rigidez k		Geral		Curvatura		Rigidez k		Geral		Curvatura		Rigidez k	
10	35	14,77	15,43	4%	15,31	4%	15,48	16,86	9%	16,11	4%	16,02	17,94	12%	16,67	4%			
10	40	15,02	15,87	6%	15,72	5%	15,98	17,73	11%	16,80	5%	16,74	19,15	14%	17,58	5%			
10	45	15,32	16,36	7%	16,19	6%	16,58	18,73	13%	17,61	6%	17,62	20,51	16%	18,66	6%			
10	50	15,66	16,92	8%	16,73	7%	17,31	19,83	15%	18,55	7%	18,70	22,04	18%	19,94	7%			
10	55	16,04	17,53	9%	17,33	8%	18,17	21,06	16%	19,62	8%	20,03	23,73	18%	21,42	7%			
10	60	16,49	18,20	10%	18,00	9%	19,20	22,40	17%	20,83	8%	21,69	25,58	18%	23,12	7%			
10	65	17,00	18,93	11%	18,74	10%	20,44	23,86	17%	22,19	9%	23,77	27,59	16%	25,07	5%			
10	70	17,58	19,72	12%	19,56	11%	21,94	25,43	16%	23,71	8%	26,45	29,76	13%	27,26	3%			
10	75	18,23	20,56	13%	20,44	12%	23,78	27,13	14%	25,38	7%	29,97	32,10	7%	29,72	-1%			
10	80	18,99	21,47	13%	21,40	13%	26,06	28,93	11%	27,23	4%	34,77	34,59	-1%	32,45	-7%			
10	85	19,85	22,43	13%	22,43	13%	28,94	30,86	7%	29,24	1%	<b>41,65</b>	<b>37,24</b>	<b>-11%</b>	<b>35,45</b>	<b>-15%</b>			
10	90	20,83	23,45	13%	23,54	13%	32,68	32,90	1%	31,42	-4%	<b>52,23</b>	<b>40,06</b>	<b>-23%</b>	<b>38,71</b>	<b>-26%</b>			

Tabela 3: Momento total solicitante de cálculo (kNm) para situações E4, E5 e E6.

Fonte: Autores.

Mk	$\lambda$	Esforço normal Nk = 100 kN						Esforço normal Nk = 200 kN						Esforço normal Nk = 300 kN					
		Geral		Curvatura		Rigidez k		Geral		Curvatura		Rigidez k		Geral		Curvatura		Rigidez k	
20	35	29,55	29,43	0%	29,50	0%	30,95	30,86	0%	30,62	-1%	32,04	31,94	0%	31,50	-2%			
20	40	30,05	29,87	-1%	29,97	0%	31,96	31,73	-1%	31,44	-2%	33,48	33,15	-1%	32,62	-3%			
20	45	30,63	30,36	-1%	30,49	0%	33,17	32,73	-1%	32,39	-2%	<b>35,24</b>	<b>34,51</b>	<b>-2%</b>	<b>33,93</b>	<b>-4%</b>			
20	50	31,31	30,92	-1%	31,09	-1%	34,62	33,83	-2%	33,46	-3%	<b>37,40</b>	<b>36,04</b>	<b>-4%</b>	<b>35,42</b>	<b>-5%</b>			
20	55	32,09	31,53	-2%	31,75	-1%	36,34	35,06	-4%	34,67	-5%	<b>40,06</b>	<b>37,73</b>	<b>-6%</b>	<b>37,11</b>	<b>-7%</b>			
20	60	32,98	32,20	-2%	32,48	-2%	38,40	36,40	-5%	36,01	-6%	<b>43,37</b>	<b>39,58</b>	<b>-9%</b>	<b>39,01</b>	<b>-10%</b>			
20	65	33,99	32,93	-3%	33,27	-2%	<b>40,88</b>	<b>37,86</b>	<b>-7%</b>	<b>37,49</b>	<b>-8%</b>	<b>47,54</b>	<b>41,59</b>	<b>-13%</b>	<b>41,12</b>	<b>-13%</b>			
20	70	35,15	33,72	-4%	34,14	-3%	<b>43,88</b>	<b>39,43</b>	<b>-10%</b>	<b>39,11</b>	<b>-11%</b>	<b>52,89</b>	<b>43,76</b>	<b>-17%</b>	<b>43,46</b>	<b>-18%</b>			
20	75	36,47	34,56	-5%	35,07	-4%	<b>47,56</b>	<b>41,13</b>	<b>-14%</b>	<b>40,88</b>	<b>-14%</b>	<b>59,94</b>	<b>46,10</b>	<b>-23%</b>	<b>46,03</b>	<b>-23%</b>			
20	80	37,97	35,47	-7%	36,08	-5%	<b>52,12</b>	<b>42,93</b>	<b>-18%</b>	<b>42,79</b>	<b>-18%</b>	<b>69,55</b>	<b>48,59</b>	<b>-30%</b>	<b>48,83</b>	<b>-30%</b>			
20	85	39,69	36,43	-8%	37,16	-6%	<b>57,88</b>	<b>44,86</b>	<b>-22%</b>	<b>44,86</b>	<b>-22%</b>	<b>83,30</b>	<b>51,24</b>	<b>-38%</b>	<b>51,88</b>	<b>-38%</b>			
20	90	<b>41,67</b>	<b>37,45</b>	<b>-10%</b>	<b>38,31</b>	<b>-8%</b>	<b>65,36</b>	<b>46,90</b>	<b>-28%</b>	<b>47,09</b>	<b>-28%</b>	<b>104,47</b>	<b>54,06</b>	<b>-48%</b>	<b>55,16</b>	<b>-47%</b>			

Tabela 4: Momento total solicitante de cálculo (kNm) para situações E7, E8 e E9.

Fonte: Autores.

Para uma melhor visualização dos dados dispostos acima, procedeu-se à elaboração de gráficos para cada uma das situações, apresentados nas figuras 6, 7 e 8.

Nas situações E1, E2 e E3, podemos observar que a intensidade do momento total solicitante de cálculo, com exceção dos índices de esbeltez menores, é bem divergente para os métodos estudados (ver figura 6). Nas três situações, o método do pilar-padrão

com curvatura aproximada apresenta as maiores intensidades do momento total solicitante de cálculo, seguido pelo método do pilar-padrão com rigidez  $k$  aproximada. O método do pilar-padrão com curvatura aproximada apresentou valores até 58% (E1), 69% (E2) e 73% (E3) superiores os obtidos pelo método geral. Já o método do pilar-padrão com rigidez  $k$  aproximada apresentou resultados até 51% (E1), 43% (E2) e 37% (N3) superiores aos obtidos pelo método geral.

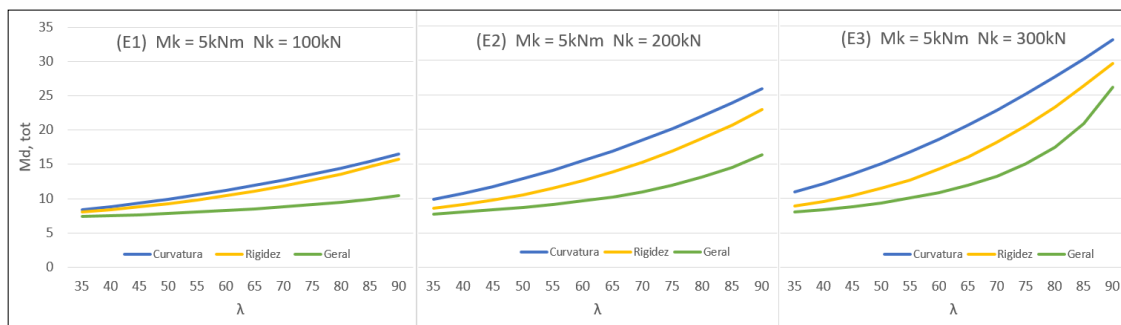


Figura 6: Momento total solicitante de cálculo (kNm) para situações E1, E2 e E3.

Fonte: Autores.

Nas situações E4, E5 e E6, nota-se que os resultados obtidos pelos três métodos foram muito próximos (ver figura 7). O método do pilar-padrão com curvatura aproximada apresentou valores até 13% (E4), 17% (E5) e 18% (E6) superiores aos obtidos pelo método geral. Já o método do pilar-padrão com rigidez  $k$  aproximada apresentou resultados até 13% (E4), 9% (E5) e 7% (N6) superiores aos obtidos pelo método geral. Entretanto, para os maiores índices de esbeltez da situação N6 o método geral apresentou momento total de cálculo superior aos métodos aproximados.

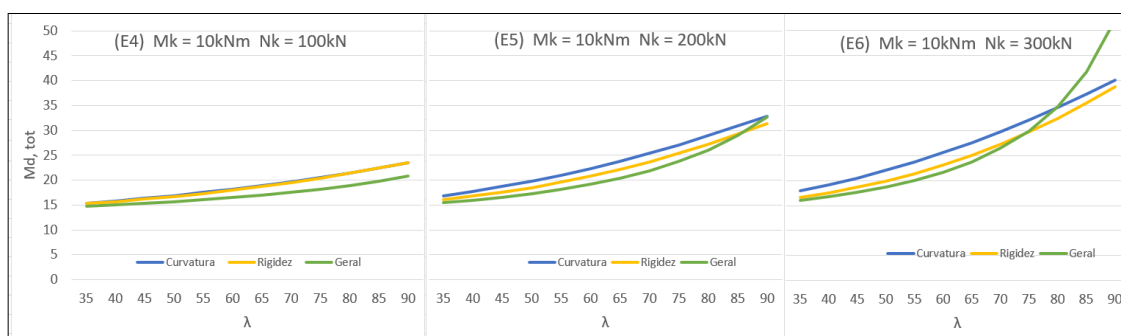


Figura 7: Momento total solicitante de cálculo (kN.m) para situações E4, E5 e E6.

Fonte: Autores

Em E7, E8 e E9, observa-se que a intensidade do momento total solicitante de cálculo para os menores valores de índices de esbeltez testados é praticamente igual, independentemente do método utilizado para o cálculo (ver figura 8). Com o aumento

do índice de esbeltez, a intensidade do momento total solicitante calculado pelo método geral se torna cada vez mais superior ao calculado pelos métodos aproximados, por outro lado, os valores dos métodos aproximados continuam praticamente iguais entre si.

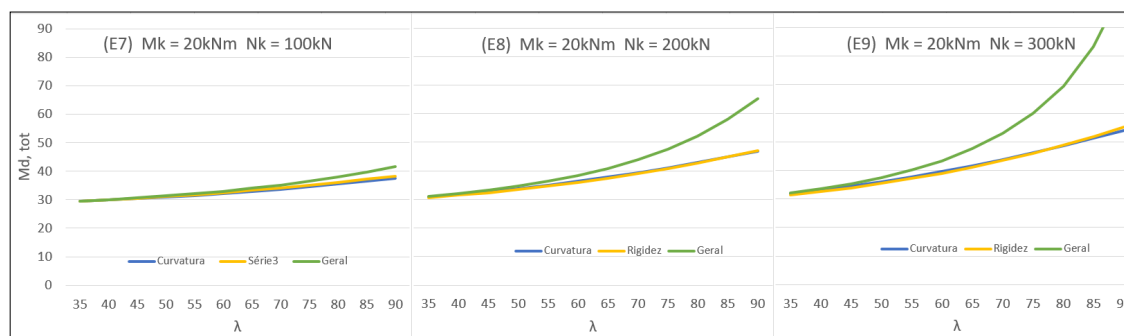


Figura 8: Momento total solicitante de cálculo (kNm) para situações E7, E8 e E9.

Fonte: Autores.

Embora nas situações E6, E7, E8 e E9 haja casos em que o momento total obtido pelo método geral teve valor superior ao obtido pelos métodos aproximados, essa condição se dá quando o pilar não mais resiste à solicitação (valores em negrito nas tabelas 2, 3 e 4), isto é, já foi esgotada a capacidade resistente, o que leva o projetista a redimensionar o pilar aumentando a seção para reduzir o índice de esbeltez ou modificando o projeto para reduzir os esforços atuantes de primeira ordem, o que faz com que o pilar volte a resistir aos esforços, condição na qual se observa que os métodos aproximados obtêm valores de esforços superiores ou praticamente iguais ao método geral.

## 8 | CONCLUSÃO

A comparação entre o método do pilar-padrão com curvatura aproximada, o método do pilar-padrão com rigidez  $k$  aproximada e o método geral de cálculo do efeito local de segunda ordem realizada neste trabalho mostrou que o momento total solicitante calculado pelos métodos aproximados é igual ou superior ao obtido pelo método geral, desde que não ocorra o esgotamento da capacidade resistente do pilar, condição identificada nos casos com grande momento inicial, esforço normal e índice de esbeltez combinados. Também foi possível verificar que o método do pilar-padrão com curvatura aproximada apresenta intensidade do momento total superior ao método do pilar-padrão com rigidez  $k$  aproximada na maioria dos casos e nos demais apresenta intensidade praticamente igual. As maiores divergências percentuais entre os métodos aproximados foram observadas para os menores momentos iniciais, essas foram também as situações nas quais os métodos aproximados se mostraram mais conservadores em relação ao método geral.

Dessa forma, o método do pilar-padrão com curvatura aproximada e o método do pilar-padrão com rigidez  $k$  aproximada para determinação do efeito local de segunda

ordem apresentam resultados a favor da segurança quando comparados ao método geral, sem, entretanto, divergir excessivamente deste no cálculo de solicitações para as situações mais usuais de pilares de concreto armado, sendo o método do pilar-padrão com rigidez  $k$  aproximada o método aproximado com valores mais próximos ao método geral e o método do pilar-padrão com curvatura aproximada o método aproximado mais conservador.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6118 Projeto de Estruturas de Concreto Armado: Procedimento**. Rio de Janeiro, 2014.

BORGES, A.C.L. **Análise de pilares esbeltos de concreto armado solicitados à flexo-compressão oblíqua**. Dissertação. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 1999.

BANKI, A.L. **Método do pilar-padrão com rigidez aproximada**. Informativo da Comunidade AltoQi, nº 38, 2004. Disponível em <<http://faq.altoqi.com.br/content/264/639/pt-br/metodo-do-pilar-padrão-com-rigidez-aproximada.html>> Acesso em 26 de Março de 2019.

CARVALHO, R. C.; PINHEIRO, L. M. **Cálculo e Detalhamento de Estruturas Usuais de Concreto Armado**, v. 2. São Paulo. Pini, 2013.

MONCAYO, W. J. Z. **Análise de Segunda Ordem Global em Edifícios com Estrutura de Concreto Armado**. Dissertação. Escola de engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Calos, 2011.

SCADELAI, M. A. **Dimensionamento de Pilares de acordo com a NBR 6118 2003**. Dissertação. Escola de engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Calos, 2004.

## 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  $\gamma_z$ , 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  $\alpha$  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**