



# As Engenharias frente a Sociedade, a Economia e o Meio Ambiente 2

Henrique Ajuz Holzmann  
(Organizador)

Atena  
Editora  
Ano 2019

Henrique Ajuz Holzmann  
(Organizador)

As Engenharias frente a Sociedade, a  
Economia e o Meio Ambiente 2

Atena Editora  
2019

2019 by Atena Editora  
Copyright © Atena Editora  
Copyright do Texto © 2019 Os Autores  
Copyright da Edição © 2019 Atena Editora  
Editora Executiva: Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Antonella Carvalho de Oliveira  
Diagramação: Natália Sandrini  
Edição de Arte: Lorena Prestes  
Revisão: Os Autores

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**

Prof. Dr. Álvaro Augusto de Borba Barreto – Universidade Federal de Pelotas  
Prof. Dr. Antonio Carlos Frasson – Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Prof. Dr. Antonio Isidro-Filho – Universidade de Brasília  
Prof. Dr. Constantino Ribeiro de Oliveira Junior – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Cristina Gaio – Universidade de Lisboa  
Prof. Dr. Deyvison de Lima Oliveira – Universidade Federal de Rondônia  
Prof. Dr. Gilmei Fleck – Universidade Estadual do Oeste do Paraná  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionele delle Figlie de Maria Ausiliatrice  
Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande  
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

#### **Ciências Agrárias e Multidisciplinar**

Prof. Dr. Alan Mario Zuffo – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul  
Prof. Dr. Alexandre Igor Azevedo Pereira – Instituto Federal Goiano  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Daiane Garabeli Trojan – Universidade Norte do Paraná  
Prof. Dr. Darllan Collins da Cunha e Silva – Universidade Estadual Paulista  
Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia  
Prof. Dr. Jorge González Aguilera – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul  
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará  
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas

#### **Ciências Biológicas e da Saúde**

Prof. Dr. Benedito Rodrigues da Silva Neto – Universidade Federal de Goiás  
Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Elane Schwinden Prudêncio – Universidade Federal de Santa Catarina  
Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria  
Prof. Dr. José Max Barbosa de Oliveira Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará

Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte  
Profª Drª Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão  
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. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará  
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte  
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista

### **Conselho Técnico Científico**

Prof. Msc. Abrãao Carvalho Nogueira – Universidade Federal do Espírito Santo  
Prof. Dr. Adaylson Wagner Sousa de Vasconcelos – Ordem dos Advogados do Brasil/Seccional Paraíba  
Prof. Msc. André Flávio Gonçalves Silva – Universidade Federal do Maranhão  
Prof.ª Drª Andreza Lopes – Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento Acadêmico  
Prof. Msc. Carlos Antônio dos Santos – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro  
Prof. Msc. Daniel da Silva Miranda – Universidade Federal do Pará  
Prof. Msc. Eliel Constantino da Silva – Universidade Estadual Paulista  
Prof.ª Msc. Jaqueline Oliveira Rezende – Universidade Federal de Uberlândia  
Prof. Msc. Leonardo Tullio – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Prof.ª Msc. Renata Luciane Polsaque Young Blood – UniSecal  
Prof. Dr. Welleson Feitosa Gazel – Universidade Paulista

| <b>Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)<br/>(eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)</b> |   |
|---|---|
| E57   | <p>As engenharias frente a sociedade, a economia e o meio ambiente 2 [recurso eletrônico] / Organizador Henrique Ajuz Holzmann. – Ponta Grossa (PR): Atena Editora, 2019. – (As Engenharias Frente a Sociedade, a Economia e o Meio Ambiente; v. 2)</p> <p>Formato: PDF<br/>Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader<br/>Modo de acesso: World Wide Web<br/>Inclui bibliografia<br/>ISBN 978-85-7247-430-6<br/>DOI 10.22533/at.ed.306192506</p> <p>1. Engenharia – Aspectos sociais. 2. Engenharia – Aspectos econômicos. 3. Desenvolvimento sustentável. I. Holzmann, Henrique Ajuz. II. Série.</p> <p style="text-align: right;">CDD 658.5</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

As obras As Engenharias frente a Sociedade, a Economia e o Meio Ambiente Volume 1, 2, 3 e 4 abordam os mais diversos assuntos sobre métodos e ferramentas nas diversas áreas das engenharias a fim de melhorar a relação do homem com o meio ambiente e seus recursos.

O Volume 1 está disposto em 31 capítulos, com assuntos voltados a engenharia do meio ambiente, apresentando processos de recuperação e reaproveitamento de resíduos e uma melhor aplicação dos recursos disponíveis no ambiente, além do panorama sobre novos métodos de obtenção limpa da energia.

Já o Volume 2, está organizado em 32 capítulos e apresenta uma vertente ligada ao estudo dos solos e águas, com estudos de sua melhor utilização, visando uma menor degradação do ambiente; com aplicações voltadas a construção civil de baixo impacto.

O Volume 3 apresenta estudos de materiais para aplicação eficiente e econômica em projetos, bem como o desenvolvimento de projetos mecânico e eletroeletrônicos voltados a otimização industrial e a redução de impacto ambiental, sendo organizados na forma de 28 capítulos.

No último Volume, são apresentados capítulos com temas referentes a engenharia de alimentos, e a melhoria em processos e produtos.

Desta forma um compendio de temas e abordagens que facilitam as relações entre ensino-aprendizado são apresentados, a fim de se levantar dados e propostas para novas discussões em relação ao ensino nas engenharias, de maneira atual e com a aplicação das tecnologias hoje disponíveis.

Boa leitura

Henrique Ajuz Holzmann

## SUMÁRIO

|   |           |
|---|-----------|
| <b>CAPÍTULO 1</b> .....   | <b>1</b>  |
| ESTUDOS DA ÁGUA E SEDIMENTOS NA BACIA DO RIO UBERABINHA EM UBERLÂNDIA - MG  |           |
| Maria da Graça Vasconcelos  |           |
| Luiz Alfredo Pavanin  |           |
| Erich Vectore Pavanin   |           |
| <b>DOI 10.22533/at.ed.3061925061</b>  |           |
| <b>CAPÍTULO 2</b> .....   | <b>13</b> |
| BATIMETRIA E MEDIÇÃO DE VAZÃO NA BACIA DO RIO JI-PARANÁ - RO  |           |
| Renato Billia de Miranda  |           |
| Camila Bermond Ruezzeno   |           |
| Bruno Bernardo dos Santos   |           |
| Frederico Fabio Mauad   |           |
| <b>DOI 10.22533/at.ed.3061925062</b>  |           |
| <b>CAPÍTULO 3</b> .....   | <b>26</b> |
| MONITORAMENTO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA PARA ENSAIO DE PROVA DE CARGA EM SOLO BASÁLTICO   |           |
| Daniel Russi  |           |
| Sandra Garcia Gabas   |           |
| Giancarlo Lastoria  |           |
| <b>DOI 10.22533/at.ed.3061925063</b>  |           |
| <b>CAPÍTULO 4</b> .....   | <b>37</b> |
| UTILIZAÇÃO DO MÉTODO PAPEL FILTRO E CENTRÍFUGA PARA DETERMINAÇÃO DE CURVAS DE RETENÇÃO DE ÁGUA NO SOLO E CORRELAÇÕES COM PARÂMETROS GEOTÉCNICOS |           |
| Ana Carolina Dias Baêso   |           |
| Eduardo Souza Cândido   |           |
| Roberto Francisco de Azevedo  |           |
| Gustavo Armando dos Santos  |           |
| Tulyo Diniz Oliveira  |           |
| <b>DOI 10.22533/at.ed.3061925064</b>  |           |
| <b>CAPÍTULO 5</b> .....   | <b>51</b> |
| DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS CARACTERÍSTICOS DE UM SOLO TROPICAL DA BAIXADA FLUMINENSE NO ESTADO DO RIO DE JANEIRO                                |           |
| Fernando Benedicto Mainier  |           |
| Claudio Fernando Mahler   |           |
| Viktor Labuto Ramos   |           |
| <b>DOI 10.22533/at.ed.3061925065</b>  |           |
| <b>CAPÍTULO 6</b> .....   | <b>61</b> |
| ELABORAÇÃO DE UMA CARTA DE UNIDADES DE TERRENO DO MUNICÍPIO DE CACHOEIRO DE ITAPEMIRIM – ES   |           |
| Bruna Xavier Faitanin   |           |
| Éder Carlos Moreira   |           |
| Altair Carrasco de Souza  |           |
| Vitor Roberto Schettino   |           |
| <b>DOI 10.22533/at.ed.3061925066</b>  |           |

|   |            |
|---|------------|
| <b>CAPÍTULO 7 .....</b>   | <b>69</b>  |
| ESTABILIZAÇÃO DE UM SOLO SILTE ARENOSO DA FORMAÇÃO GUABIROTUBA COM CAL PARA USO EM PAVIMENTAÇÃO                     |            |
| Wagner Teixeira   |            |
| Eclesielter Batista Moreira   |            |
| João Luiz Rissardi  |            |
| Vanessa Corrêa de Andrade   |            |
| Ronaldo Luis dos Santos Izzo  |            |
| <b>DOI 10.22533/at.ed.3061925067</b>  |            |
| <b>CAPÍTULO 8 .....</b>   | <b>80</b>  |
| INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE CAL HIDRATADA NA RESISTÊNCIA DE SOLOS SEDIMENTARES  |            |
| Jair de Jesús Arrieta Baldovino   |            |
| Eclesielter Batista Moreira   |            |
| Ronaldo Luis Dos Santos Izzo  |            |
| Juliana Lundgren Rose   |            |
| Erico Rafael Da Silva   |            |
| Wagner Teixeira   |            |
| Felipe Perretto   |            |
| Roberto Pan   |            |
| <b>DOI 10.22533/at.ed.3061925068</b>  |            |
| <b>CAPÍTULO 9 .....</b>   | <b>95</b>  |
| PERFILAGEM DO SUBSOLO NO MUNICÍPIO DE APUCARANA-PR COM BASE EM DADOS DE SONDAGENS DE SIMPLES RECONHECIMENTO COM SPT |            |
| Mariana Alher Fernandes   |            |
| Augusto Montor de Freitas Luiz  |            |
| <b>DOI 10.22533/at.ed.3061925069</b>  |            |
| <b>CAPÍTULO 10 .....</b>  | <b>104</b> |
| UTILIZAÇÃO DO PERMEÂMETRO DE TUBO NA DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE DE CAMADAS SUPERFICIAIS DE SOLOS |            |
| Marcos Túlio Fernandes  |            |
| Glaucimar Lima Dutra  |            |
| <b>DOI 10.22533/at.ed.30619250610</b>   |            |
| <b>CAPÍTULO 11 .....</b>  | <b>116</b> |
| DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURAS DE CONTENÇÃO EM SOLO REFORÇADO COM GEOSSINTÉTICOS                                     |            |
| Alessandra Lidia Mazon  |            |
| Maytê Pietrobelli de Souza  |            |
| Bianca Penteado de Almeida Tonus  |            |
| André Fanaya  |            |
| <b>DOI 10.22533/at.ed.30619250611</b>   |            |

**CAPÍTULO 12 ..... 133**

AVALIAÇÃO DA ERODIBILIDADE DO SOLO DE CARACTERÍSTICA NÃO LATERÍTICA SOB O ENFOQUE GEOTÉCNICO NAS MARGENS DA TO-222 NO MUNICÍPIO DE ARAGUAÍNA - TO

Glacielle Fernandes Medeiros  
Renata de Moraes Farias  
Palloma Borges Soares  
Ana Sofia Oliveira Japiassu  
Andressa Fiuza de Souza  
Igor Guimarães Matias

**DOI 10.22533/at.ed.30619250612**

**CAPÍTULO 13 ..... 144**

ADAPTAÇÃO DE METODOLOGIA DE HIERARQUIZAÇÃO DE NÍVEIS DE ATENÇÃO UTILIZADA EM MINERAÇÃO PARA TRABALHOS DE MAPEAMENTO DE RISCOS GEOTÉCNICOS EM ÁREA URBANA

Marcelo Corrêa da Silva  
Daiara Luiza Guimarães

**DOI 10.22533/at.ed.30619250613**

**CAPÍTULO 14 ..... 157**

PRODUÇÃO DE CONCENTRADO ÚMIDO FOSFATADO: UMA EXPERIÊNCIA DE ESTÁGIO NA MINERAÇÃO

Matheus Henrique Borges Coutinho  
Ricardo Antonio de Rezende  
Cibele Tunussi  
Marcos Vinicius Agapito Mendes

**DOI 10.22533/at.ed.30619250614**

**CAPÍTULO 15 ..... 163**

ESTUDO DOS DESPERDÍCIOS DE MATERIAIS NA CONSTRUÇÃO CIVIL E SUGESTÕES PARA A MINIMIZAÇÃO E REUTILIZAÇÃO DOS MESMOS, VISANDO A OTIMIZAÇÃO DOS CUSTOS DAS OBRAS E MENORES IMPACTOS AMBIENTAIS

Beatriz Zeurgo Fernandes  
Rafael Bergjohann  
Luiz Carlos de Campos

**DOI 10.22533/at.ed.30619250615**

**CAPÍTULO 16 ..... 176**

USO DA CINZA DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR COMO SUBSTITUTO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND

Kenyson Diony Souza Silva  
Raduan Krause Lopes  
Fabiano Medeiros Da Costa

**DOI 10.22533/at.ed.30619250616**

**CAPÍTULO 17 ..... 192**

ESTUDOS PRELIMINARES DA APLICAÇÃO DE RESÍDUO DE MINÉRIO DE COBRE SULFETADO NA ELABORAÇÃO DE ARGAMASSAS DE ASSENTAMENTO E REVESTIMENTO

Julia Alves Rodrigues  
Dilson Nazareno Pereira Cardoso  
Abel Jorge Rodrigues Ferreira  
Edinaldo José de Sousa Cunha  
Bruno Marques Viegas  
Edilson Marques Magalhães  
José Antônio da Silva Souza

**DOI 10.22533/at.ed.30619250617**

**CAPÍTULO 18 ..... 200**

AValiação DO COMPORTAMENTO DE COMPOSIÇÕES A BASE DE CIMENTO DE ALUMINATO DE CÁLCIO FRENTE AOS MICRORGANISMOS STAPHYLOCOCCUS AUREUS E ESCHERICHIA COLI

Renata Martins Parrreira  
Talita Luana de Andrade  
Newton Soares da Silva  
Cristina Pacheco Soares  
Victor Carlos Pandolfelli  
Ivone Regina de Oliveira

**DOI 10.22533/at.ed.30619250618**

**CAPÍTULO 19 ..... 209**

UMA TÉCNICA, BASEADA EM PROJETO DE EXPERIMENTOS, PARA OTIMIZAÇÃO DA DOSAGEM DE ARGAMASSA MISTA DE CIMENTO, CAL E AREIA

André Rodrigues Monticeli  
Paulo César Mappa  
Aellington Freire de Araújo  
Emerson Ricky Pinheiro  
Karoline Santos da Silva

**DOI 10.22533/at.ed.30619250619**

**CAPÍTULO 20 ..... 221**

REDUÇÃO DO CONSUMO DE AÇO EM VIGAS DE CONCRETO ARMADO SUBMETIDAS AO ESFORÇO CORTANTE ATRAVÉS DA ESCOLHA DO ÂNGULO DAS BIELAS

Lucas Teotônio de Souza  
Paula de Oliveira Ribeiro

**DOI 10.22533/at.ed.30619250620**

**CAPÍTULO 21 ..... 232**

ANÁLISE DE CRONOGRAMA FÍSICO x CRONOGRAMA REALIZADO NA OBRA DO FÓRUM DE RIO NEGRO/PR PARA FINS DE DIMINUIÇÃO DOS ATRASOS

Nathalia Loureiro de Almeida Correa

**DOI 10.22533/at.ed.30619250621**

**CAPÍTULO 22 ..... 250**

ANÁLISE DA IMPORTÂNCIA DO CORRETO DIMENSIONAMENTO DOS VERTEDORES EM BARRAGENS E SUAS INFLUÊNCIAS ECOLÓGICAS E SOCIOECONÔMICAS. ESTUDO DE CASO: USINA HIDRELÉTRICA DE XINGÓ

Jéssica Beatriz Dantas  
Djair Félix da Silva

**DOI 10.22533/at.ed.30619250622**

|  |            |
|--|------------|
| <b>CAPÍTULO 23</b> .....   | <b>262</b> |
| ANÁLISE DA IMPLANTAÇÃO DE PAVIMENTO PERMEÁVEL EM UMA ÁREA DA CIDADE DE JOINVILLE/SC  |            |
| Adilon Marques dos Santos  |            |
| <b>DOI 10.22533/at.ed.30619250623</b>  |            |
| <b>CAPÍTULO 24</b> .....   | <b>281</b> |
| ANÁLISE NUMÉRICA DA SENSIBILIDADE DO ALGORITMO IMPLEX APLICADO EM UM CENÁRIO HIPOTÉTICO DE ESTABILIDADE DE TALUDE VIA TÉCNICA DE DESCONTINUIDADES FORTES |            |
| Nayara Torres Belfort  |            |
| Ana Itamara Paz de Araujo  |            |
| Kátia Torres Botelho Galindo   |            |
| Igor Fernandes Gomes   |            |
| Leonardo José do Nascimento Guimarães  |            |
| <b>DOI 10.22533/at.ed.30619250624</b>  |            |
| <b>CAPÍTULO 25</b> .....   | <b>294</b> |
| DIMENSIONAMENTO DE LAJES MACIÇAS POR MEIO DE CÁLCULO MANUAL E COM O AUXÍLIO DE UM SOFTWARE COMPUTACIONAL   |            |
| Iva Emanuely Pereira Lima  |            |
| Vitor Bruno Santos Pereira   |            |
| Vinicius Costa Correia   |            |
| <b>DOI 10.22533/at.ed.30619250625</b>  |            |
| <b>CAPÍTULO 26</b> .....   | <b>306</b> |
| DIMENSIONAMENTO OTIMIZADO DE PILARES MISTOS PREENCHIDOS DE AÇO E CONCRETO  |            |
| Jéssica Salomão Lourenção  |            |
| Élcio Cassimiro Alves  |            |
| <b>DOI 10.22533/at.ed.30619250626</b>  |            |
| <b>CAPÍTULO 27</b> .....   | <b>325</b> |
| ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS: MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS   |            |
| João Augusto Dunck Dalosto   |            |
| Luiz Fernando Hencke   |            |
| Jhonatan Conceição dos Santos  |            |
| Hevrlí da Silva Carneiro Pilatti   |            |
| <b>DOI 10.22533/at.ed.30619250627</b>  |            |
| <b>CAPÍTULO 28</b> .....   | <b>336</b> |
| APLICAÇÃO DO CPR EM SOLOS MOLES NA REGIÃO DO CAMPO DOS PERDIZES: DUPLICAÇÃO DA BR 135, ENTRE O KM 39,36 E O KM 39,90                                     |            |
| Rodrigo Nascimento Barros  |            |
| Larysse Lohana Leal Nunes  |            |
| Saymo Wendel de Jesus Peixoto Viana  |            |
| <b>DOI 10.22533/at.ed.30619250628</b>  |            |
| <b>CAPÍTULO 29</b> .....   | <b>348</b> |
| ANÁLISE DA QUALIDADE DO AR INTERNO DE UMA TERAPIA INTENSIVA  |            |
| Sylvia Katherine de Medeiros Moura   |            |
| Antonio Calmon de Araújo Marinho   |            |
| Wagner Amadeus Galvão de Souza   |            |
| Angelo Roncalli Oliveira Guerra  |            |
| <b>DOI 10.22533/at.ed.30619250629</b>  |            |

|   |            |
|---|------------|
| <b>CAPÍTULO 30</b> .....  | <b>357</b> |
| ‘ARTENGENHARIA’: UMA PONTE TRANSDISCIPLINAR PARA O DESENVOLVIMENTO DO POTENCIAL HUMANO E SUAS CONTRIBUIÇÕES PARA A GESTÃO DO CONHECIMENTO |            |
| Ana Alice Trubbianelli  |            |
| <b>DOI 10.22533/at.ed.30619250630</b>   |            |
| <b>CAPÍTULO 31</b> .....  | <b>371</b> |
| PROCEDIMENTO DE ANÁLISE EXPERIMENTAL E NÚMÉRICO DE UMA PONTE EXECUTADA COM PALITOS DE PICOLÉ  |            |
| Matheus Henrique Morato de Moraes   |            |
| João Eduardo Sousa de Freitas   |            |
| Diogo Henrique Morato de Moraes   |            |
| Juarez Francisco Freire Junior  |            |
| Wellington Andrade da Silva   |            |
| Geraldo Magela Gonçalves Filho  |            |
| <b>DOI 10.22533/at.ed.30619250631</b>   |            |
| <b>CAPÍTULO 32</b> .....  | <b>383</b> |
| EXERGIA HÍDRICA EM SISTEMAS REDUTORES DE PRESSÃO  |            |
| Conrado Mendes Moraes   |            |
| Ângela B. D. Moura  |            |
| Eduardo D. P. Schuch  |            |
| Eduardo de M. Martins   |            |
| <b>DOI 10.22533/at.ed.30619250632</b>   |            |
| <b>SOBRE O ORGANIZADOR</b> .....  | <b>393</b> |

## DIMENSIONAMENTO OTIMIZADO DE PILARES MISTOS PREENCHIDOS DE AÇO E CONCRETO

**Jéssica Salomão Lourenção**

Universidade Federal do Espírito Santo  
Vitória – Espírito Santo

**Élcio Cassimiro Alves**

Universidade Federal do Espírito Santo,  
Vitória – Espírito Santo

**RESUMO:** A utilização de perfis de aço de seções tubulares para pilares mistos preenchidos de aço e concreto é uma solução interessante para a construção civil, visto que esse tipo de perfil apresenta grande resistência aos esforços solicitantes, além da dispensa do uso de formas e proteção contra o fogo e a corrosão. Este artigo objetiva estudar o dimensionamento otimizado de pilares mistos preenchidos de aço e concreto seguindo as prescrições da NBR 8800:2008 e da NBR 16239:2013. O desenvolvimento da formulação será feito dentro da plataforma do *Matlab 2016a*, com uma interface gráfica visando à facilidade de manuseio do usuário. A solução do problema será obtida via método dos pontos interiores, programação quadrática sequencial e algoritmo genético para verificar a eficiência dos algoritmos de otimização. Exemplos de aplicação serão apresentados de modo a validar a formulação proposta bem como desenvolver um estudo do comportamento de cada técnica com relação à resistência efetiva da solução

otimizada.

**PALAVRAS-CHAVE:** Pilares Mistos; Otimização; Perfil Tubular.

**ABSTRACT:** The use of tubular sections to filled concrete columns of steel and concrete is an interesting solution for the civil construction, since this type of profile presents great resistance to the requesting efforts, besides the dispensation of the use of forms and protection against the fire and corrosion. This article aims to study the optimized design of filled concrete columns of steel and concrete following the requirements of NBR 8800:2008 and NBR 16239:2013. The development of the formulation will be done within the *Matlab 2016a* platform, along with an interface that provides the user an easier manipulation. The solution of the problem will be obtained through the interior points method, quadratic sequential programming and genetic algorithm to verify the efficiency of the optimization algorithms. Application examples will be presented to validate the proposed formulation as well as create a detail study of the behavior of each technique with reference to the effective resistance of the optimized solution.

**KEYWORDS:** Composite Columns; Optimization; Tubular Section.

## 1 | INTRODUÇÃO

Os perfis tubulares de aço sempre foram muito utilizados na construção civil por apresentarem grande resistência aos esforços solicitantes, além de apresentarem vantagens tais como proteção contra o fogo e a corrosão e dispensa do uso de formas. Um pilar misto preenchido é composto por um perfil de aço que trabalha em conjunto com o concreto, unindo a capacidade de resistência do aço com a robustez do concreto, apresentando três tipos de geometrias de seções transversais disponíveis, circular, retangular e quadrada, possibilitando assim, inúmeras geometrias de seções transversais com ou sem armações que satisfazem cada situação de esforço solicitante.

Pilares mistos com este tipo de configuração foram citados em estudos como os de Fernandes (1997), De Nardin (1999), De Nardin (2003), Oliveira (2008), entre outros. Entretanto, os mesmos não apresentaram estudos que retratassem o dimensionamento desses pilares seguindo as exigências das normas brasileiras de dimensionamento, motivando assim, o desenvolvimento deste estudo.

Este artigo objetiva apresentar a formulação e os critérios para o dimensionamento otimizado de pilares mistos preenchidos de aço e concreto baseado nas prescrições da NBR 8800:2008 e da NBR 16239:2013. Para tal, será desenvolvido um programa computacional no *software Matlab 2016a* que, após definidos os dados dos materiais, comprimento do pilar, características do ambiente e os esforços solicitantes de cálculo, dimensionará o pilar de forma otimizada, utilizando, para a otimização determinística, o método dos pontos interiores (IP) e a programação quadrática sequencial (SQP) e para a otimização probabilística, o algoritmo genético (AG), existentes na biblioteca do *Matlab 2016a*.

## 2 | DIMENSIONAMENTO DE PILARES MISTOS PREENCHIDOS DE AÇO E CONCRETO

### 2.1 Hipóteses básicas e limites de aplicabilidade do dimensionamento

O anexo P da NBR 8800:2008 aborda as diretrizes para o dimensionamento por método simplificado. As hipóteses básicas adotadas pelo método simplificado são: total interação entre aço e concreto; a flambagem local não pode ser um estado-limite último predominante; e as imperfeições iniciais são consistentes com aquelas adotadas na determinação da resistência de barras de aço.

O método ainda possui alguns limites de aplicabilidade, tais quais: os pilares mistos devem ter dupla simetria e seções transversais constantes ao longo do comprimento; o concreto deve possuir densidade normal; a contribuição do perfil metálico para a capacidade resistente da seção mista deve estar entre 0,2 e 0,9, conforme Eq. (1); a esbeltez relativa do pilar não pode ser superior a 2,0, de acordo com Eq. (2); as seções transversais preenchidas com concreto podem ser fabricadas sem qualquer

armadura, exceto para algumas condições em situação de incêndio; a relação entre a altura e a largura das seções transversais mistas retangulares deve estar entre 0,2 e 5; e o projeto das armaduras deve atender aos requisitos da NBR 6118:2014.

$$\delta = \frac{A_a f_{yd}}{N_{pl,Rd}} \quad (1)$$

$$\lambda_{0,m} = \sqrt{\frac{N_{pl,R}}{N_e}} \quad (2)$$

onde:

$A_a$  área do aço;

$f_{yd}$  limite de escoamento do aço dividido pelo coeficiente de resistência do aço ( $\gamma_a$ );

$N_{pl,Rd}$  definido conforme Eq. (3);

$N_{pl,R}$  valor de  $N_{pl,Rd}$  tomando-se os coeficientes de resistência  $\gamma_a$ ,  $\gamma_c$  e  $\gamma_s$  iguais a 1,0;

$N_e$  definido conforme Eq. (8).

## 2.2 Flambagem local dos elementos de aço

Para garantir a hipótese de que as resistências de todos os materiais devem ser atingidas sem que ocorra flambagem local dos elementos componentes do perfil de aço da seção transversal, não podem ser ultrapassadas as seguintes relações, conforme Tabela 1.

| Morfologia da seção                            | Limite de esbeltez                               |
|--|--|
| Seção tubular retangular e quadrada preenchida | $\frac{b_i}{t} \leq 2,26 \sqrt{\frac{E_a}{f_y}}$ |
| Seção tubular circular preenchida              | $\frac{D}{t} \leq 0,15 \frac{E_a}{f_y}$          |

onde:

|       |  |
|-------|--|
| $b_i$ | maior dimensão paralela a um eixo de simetria da seção tubular retangular; |
| $D$   | diâmetro externo do perfil tubular circular;                               |
| $t$   | espessura da parede do perfil tubular retangular ou circular;              |
| $E_a$ | módulo de elasticidade do aço;   |
| $f_y$ | limite de escoamento do aço.   |

## 2.3 Dimensionamento segundo a nbr 8800:2008 e a nbr 16239:2013

### 2.3.1 Dimensionamento a força axial de compressão

A força axial resistente de cálculo da seção transversal à plastificação totalé calculada de acordo com a Eq. (3).

$$N_{pl,Rd} = A_a f_{yd} + \alpha A_c f_{cd} + A_s f_{sd} \quad (3)$$

onde:

$A_a, A_c, A_s$  respectivas áreas do aço, concreto e armadura;

$f_{yd}$  limite de escoamento do aço dividido pelo coeficiente de resistência do aço ( $\gamma_a$ );

$f_{cd}$  resistência característica à compressão dividido pelo coeficiente de resistência do concreto ( $\gamma_c$ );

$f_{sd}$  limite de escoamento da armadura dividido pelo coeficiente de resistência da armadura ( $\gamma_s$ );

$\alpha$  coeficiente igual a 0,95 para seções tubulares circulares preenchidas com concreto e 0,85 para as demais seções.

Devido aos efeitos de retração e fluência do concreto, uma redução no módulo de elasticidade do concreto é aplicada, tomando-se no lugar de  $E_c$ , o valor de  $E_{c,red}$  descrito na Eq. (4).

$$E_{c,red} = E_c \frac{1}{1 + \left( \frac{N_{G,sd}}{N_{sd}} \right) \varphi} \quad (4)$$

onde:

|            |  |
|------------|--|
| $E_c$      | módulo de elasticidade do concreto calculado conforme a NBR 6118:2014;   |
| $N_{G,sd}$ | parcela da força axial solicitante de cálculo devida a ação permanente e ação decorrente do uso de atuação quase permanente;   |
| $N_{sd}$   | força axial solicitante de cálculo;  |
| $\varphi$  | coeficiente de fluência do concreto, onde simplificada mente admite-se que seja tomado igual a 2,5 nas seções total ou parcialmente revestidas com concreto e igual a 0 nas seções tubulares preenchidas com concreto. |

A rigidez efetiva à flexão e a rigidez axial efetiva à compressão são calculadas respectivamente na Eq. (5) e Eq. (6), conforme a NBR 8800:2008. No entanto, a NBR 16239:2013 recomenda-se utilizar a Eq. (7) no cálculo da rigidez efetiva à flexão.

$$(EI)_e = E_a I_a + 0,6 E_{c,red} I_c + E_s I_s \quad (5)$$

$$(EA)_e = E_a A_a + E_{c,red} A_c + E_s A_s \quad (6)$$

$$(EI)_e = E_a I_a + 0,7 E_c I_c + E_s I_s \quad (7)$$

onde:

$I_a, I_c, I_s$  momentos de inércia do aço, concreto e armadura;

$E_a, E_{c,red}, E_s$  módulos de elasticidade do aço, reduzido do concreto e armadura;

$A_a, A_c, A_s$  áreas do aço, concreto e armadura.

A força axial de flambagem elástica, Eq. (8), e o fator de redução da resistência, conforme a NBR 8800:2008, Eq. (9) e Eq. (10), são obtidos conforme as equações mencionadas. No entanto, a NBR 16239:2013 recomenda utilizar a Eq. (11) para o cálculo do fator de redução da resistência.

$$N_e = \frac{\pi^2(EI)_e}{(KL)^2} \quad (8)$$

$$\lambda_{0,m} \leq 1,5 \rightarrow \chi = 0,658\lambda_{0,m}^2 \quad (9)$$

$$\lambda_{0,m} > 1,5 \rightarrow \chi = \frac{0,877}{\lambda_{0,m}^2} \quad (10)$$

$$\chi = \frac{1}{(1 + \lambda_{0,m}^{4,48})^{0,24}} \quad (11)$$

onde:

$KL$  comprimento de flambagem do pilar;

$\lambda_{0,m}$  a esbeltez relativa do pilar, conforme Eq. (2).

Portanto, o cálculo da força axial resistente de cálculo é dado na Eq. (12) e posteriormente a capacidade resistente do pilar à compressão é verificada garantindo que a força axial resistente de cálculo seja maior ou igual a força axial solicitante de cálculo, Eq. (13).

$$N_{Rd} = \chi N_{pl,Rd} \quad (12)$$

$$N_{Rd} \geq N_{Sd} \quad (13)$$

### 2.3.2 Dimensionamento a flexo-compressão

Para o dimensionamento de pilares mistos sujeitos aos efeitos combinados de força axial de compressão e momento fletor em relação a um ou aos dois eixos de simetria da seção transversal podem ser utilizados um modelo de cálculo mais simplificado, modelo de cálculo I, ou um modelo mais rigoroso, modelo de cálculo II, de acordo com a NBR 8800:2008 ou um modelo de cálculo proposto pela NBR 16239:2013.

Para tal, o momento fletor resistente de plastificação de cálculo ( $M_{pl,Rd}$ ) de seções mistas duplamente simétricas em relação ao eixo x ou ao eixo y,  $M_{pl,x,Rd}$  e  $M_{pl,y,Rd}$ , e o momento fletor máximo resistente de plastificação ( $M_{max,pl,Rd}$ ) em relação ao eixo x ou ao eixo y,  $M_{max,pl,x,Rd}$  e  $M_{max,pl,y,Rd}$ , podem ser calculados de acordo com as Eq. (14) e Eq. (15).

$$M_{pl,Rd} = f_{yd}(Z_a - Z_{an}) + 0,5f_{cd1}(Z_c - Z_{cn}) + f_{sd}(Z_s - Z_{sn}) \quad (14)$$

$$M_{max,pl,Rd} = f_{yd}Z_a + 0,5f_{cd1}Z_c + f_{sd}Z_s \quad (15)$$

onde:

- $Z_a, Z_c, Z_s$  módulos de resistência do aço, do concreto e armadura;
- $f_{yd}, f_{sd}$  Resistências de cálculo ao escoamento do aço e armadura;
- $f_{cd1}$  produto de  $\alpha f_{cd}$
- $Z_{an}, Z_{cn}, Z_{sn}$  módulos de resistência plástico de acordo com o tipo de seção transversal, definidos a seguir.

O cálculo do módulo de resistência plástico para seções circulares preenchidas e seções tubulares retangulares e quadradas é descrito nas Eq. (16) a (27).

- Seção tubular circular, de acordo com a Figura 1:

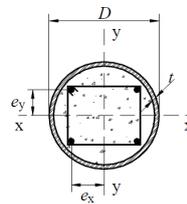


Figura 1 – Seção tubular circular preenchida com concreto

Fonte: ABNT NBR 8800 (2008)

$$Z_c = \frac{(D - 2t)^3}{4} - \frac{2}{3} \left( \frac{D}{2} - t \right)^3 - \left( \frac{D}{2} - t \right)^2 (4 - \pi) \left( \frac{D}{2} - t - \left( \frac{D}{2} - t \right) \right) - Z_s \quad (16)$$

$$Z_s = \sum_{i=1}^n |A_{si} e_i| \quad (17)$$

$$h_n = \frac{A_c f_{cd1} - A_{sn} (2f_{sd} - f_{cd1})}{2D f_{cd1} + 4t (2f_{yd} - f_{cd1})} \quad (18)$$

$$Z_{sn} = \sum_{i=1}^n |A_{sin} e_i| \quad (19)$$

$$Z_{cn} = (D - 2t) h_n^2 - Z_{sn} \quad (20)$$

$$Z_{an} = D h_n^2 - Z_{cn} - Z_{sn} \quad (21)$$

onde:

- $A_{sn}$  soma das áreas das barras da armadura na região de altura ;
- $A_{si}$  área da barra da armadura;
- $A_{sin}$  área de cada barra da armadura na região de altura ;
- $e_i$  distância do eixo da barra da armadura ao eixo de simetria relevante;
- $e_{yi}$  distância do eixo da barra da armadura ao eixo x.

- Seção tubular retangular e quadrada, de acordo com a Figura 2:

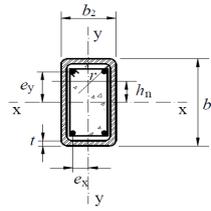


Figura 2 – Seção tubular retangular/quadrada preenchida com concreto

Fonte: ABNT NBR 8800 (2008)

- Eixo x:

$$Z_{c,x} = \frac{(b_2 - 2t)(b_1 - 2t)^2}{4} - \frac{2}{3}r^3 - r^2(4 - \pi) \left( \frac{b_1}{2} - t - r \right) - Z_{s,x} \quad (22)$$

$$Z_{s,x} = \sum_{i=1}^n |A_{si}e_i| \quad (23)$$

$$h_{n,x} = \frac{A_c f_{cd1} - A_{sn}(2f_{sd} - f_{cd1})}{2b_2 f_{cd1} + 4t(2f_{yd} - f_{cd1})} \quad (24)$$

$$Z_{sn,x} = \sum_{i=1}^n |A_{sin}e_{yi}| \quad (25)$$

$$Z_{cn,x} = (b_2 - 2t)h_n^2 - Z_{sn,x} \quad (26)$$

$$Z_{an,x} = b_2 h_n^2 - Z_{cn,x} - Z_{sn,x} \quad (27)$$

- Eixo y:

Para o cálculo com relação ao eixo y, devem ser utilizadas as equações relativas ao eixo x, porém substituindo entre si as dimensões  $b_1$  e  $b_2$ , bem como os índices subscritos x e y.

### 2.3.2.1 Modelo de cálculo I (NBR 8800:2008)

No Modelo de Cálculo I, o diagrama de interação é composto por duas retas, como indica a Figura 3 e a verificação dos efeitos da força axial de compressão e dos

momentos fletores deve satisfazer as Eq. (28) e (29).

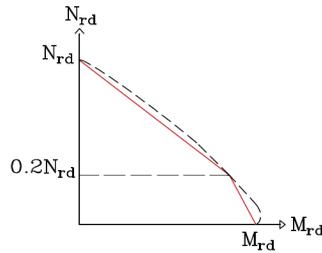


Figura 3 – Diagrama de interação momento fletor-força normal

$$\frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} \geq 0,2 \quad \frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} + \frac{8}{9} \left( \frac{M_{x,Sd}}{M_{x,Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{y,Rd}} \right) \leq 1,0 \quad (28)$$

$$\frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} < 0,2 \quad \frac{N_{Sd}}{2N_{Rd}} + \left( \frac{M_{x,Sd}}{M_{x,Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{y,Rd}} \right) \leq 1,0 \quad (29)$$

onde:

$N_{Sd}$  força axial solicitante de cálculo;

$N_{Rd}$  força axial resistente cálculo;

$M_{x,Sd}, M_{y,Sd}$  momentos fletores solicitantes em relação ao eixo x e ao eixo y da seção mista, respectivamente;

$M_{x,Rd}, M_{y,Rd}$  momentos fletores resistentes de cálculo em relação ao eixo x e ao eixo y da seção mista, respectivamente, dado por  $M_{pl,x,Rd}$  e  $M_{pl,y,Rd}$ .

### 2.3.2.2 Modelo de cálculo II (NBR 8800:2008)

No Modelo de Cálculo II, a curva de interação é formada por três retas, como indica a Figura 4, o que pode aproximar melhor os segmentos de reta à curva tracejada que representa a relação do pilar flexo-comprimido. A interação entre o momento fletor e a força normal atuante devem satisfazer as Eq. (30) a (32), sendo o cálculo de  $\mu_y$  idêntico ao cálculo de  $\mu_x$ , apenas substituindo as grandezas referentes a x por y.

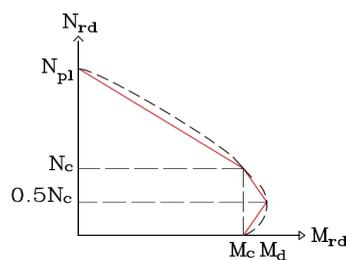


Figura 4 – Diagrama de interação momento fletor-força normal

$$N_{Sd} \geq N_c \quad \mu_x = 1 - \frac{N_{Sd} - N_{pl,c,Rd}}{N_{pl,Rd} - N_{pl,c,Rd}} \quad (30)$$

$$\frac{N_c}{2} \leq N_{Sd} \leq N_c \quad \mu_x = \left(1 - \frac{M_{d,x}}{M_{c,x}}\right) \left(\frac{2N_{Sd}}{N_{pl,c,Rd}} - 1\right) + \frac{M_{d,x}}{M_{c,x}} \quad (31)$$

$$0 \leq N_{Sd} \leq \frac{N_c}{2} \quad \mu_x = \left(1 - \frac{M_{d,x}}{M_{c,x}}\right) \left(\frac{2N_{Sd}}{N_{pl,c,Rd}} - 1\right) + \frac{M_{d,x}}{M_{c,x}} \quad (32)$$

onde:

|                        |   |
|------------------------|---|
| $N_{Sd}$               | força axial solicitante de cálculo;   |
| $N_{pl,c,Rd}$ ou $N_c$ | produto de $f_{cd}A_c$ ;  |
| $N_{pl,Rd}$            | conforme definido na Eq. (3);   |
| $M_{c,x}, M_{c,y}$     | são dados, respectivamente por $0,9M_{pl,x,Rd}$ e $0,9M_{pl,y,Rd}$ obtidos conforme Eq. (14);   |
| $M_{d,x}, M_{d,y}$     | são dados, respectivamente por $0,8M_{max,pl,x,Rd}$ e $0,8M_{max,pl,y,Rd}$ obtidos conforme Eq. (15). Caso $M_{d,x} < M_{c,x}$ , então $M_{d,x}$ deve ser tomado igual a $M_{c,x}$ . O mesmo deve ser feito em relação ao eixo y. |

Os momentos devidos às imperfeições ao longo do pilar, respectivamente em relação aos eixos x e y são obtidos conforme a Eq. (33) e Eq. (34).

$$M_{x,i,Sd} = \frac{N_{Sd}L_x}{200 \left(1 - \frac{N_{Sd}}{N_{e2,y}}\right)} \quad (33)$$

$$M_{y,i,Sd} = \frac{N_{Sd}L_y}{150 \left(1 - \frac{N_{Sd}}{N_{e2,y}}\right)} \quad (34)$$

onde:

|                      |   |
|----------------------|---|
| $N_{Sd}$             | força axial solicitante de cálculo;   |
| $L_x, L_y$           | comprimento do pilar entre contenções laterais;   |
| $N_{e2,x}, N_{e2,y}$ | força axial de flambagem elástica em relação aos eixos x e y, obtidos conforme Eq. (8). |

Assim, os momentos fletores solicitantes de cálculo totais, caso não seja feita análise mais rigorosa, são dados na Eq. (35) e Eq. (36).

$$M_{x,tot,Sd} = M_{x,Sd} + M_{x,i,Sd} \quad (35)$$

$$M_{y,tot,Sd} = M_{y,Sd} + M_{y,i,Sd} \quad (36)$$

onde:

$M_{x,Sd}, M_{y,Sd}$  momentos fletores solicitantes de cálculo.

Portanto, a verificação dos efeitos da força axial de compressão e dos momentos fletores pode ser feita por meio da Eq. (37) e Eq. (38).

$$N_{Rd} \geq N_{Sd} \quad (37)$$

$$\frac{M_{x,tot,Sd}}{\mu_x M_{c,x}} + \frac{M_{y,tot,Sd}}{\mu_y M_{c,y}} \leq 1,0 \quad (38)$$

### 2.3.2.3 Modelo de cálculo (NBR 16239:2013)

No Modelo de cálculo, o diagrama de interação é composto por duas retas, como indica a Figura 5. A verificação dos efeitos da força axial de compressão e dos momentos fletores é feita por meio da Eq. (39) e Eq.(40).

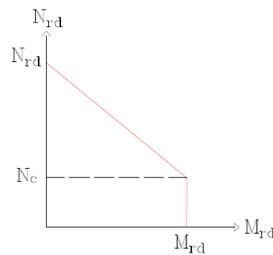


Figura 5 – Diagrama de interação momento fletor-força normal

$$N_{Sd} \leq N_c \quad \frac{M_{x,Sd}}{M_{x,Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{y,Rd}} \leq 1,0 \quad (39)$$

$$N_{Sd} \leq N_c \quad \frac{N_{Sd} - N_c}{N_{Rd} - N_c} + \frac{M_{x,Sd}}{M_{x,Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{y,Rd}} \leq 1,0 \quad (40)$$

onde:

$N_{Sd}$  força axial solicitante de cálculo;

$N_c$  força axial de compressão resistente de cálculo referente apenas à parcela de concreto, dada pelo produto  $\chi N_{pl,c,Rd}$ ;

$M_{x,Sd}, M_{y,Sd}$  momentos fletores solicitantes de cálculo;

$M_{x,Rd}, M_{y,Rd}$  são dados, respectivamente por  $M_{pl,x,Rd}$  e  $M_{pl,y,Rd}$  obtidos conforme Eq. (14).

### 3 | FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

#### 3.1 Dimensionamento otimizado determinístico

A otimização contínua será formulada com base no método dos Pontos Interiores (IP) e na Programação Quadrática Sequencial (SQP). O problema de otimização se baseia em encontrar a solução ótima que maximize ou minimize a função objetivo e no caso do dimensionamento de pilares mistos preenchidos de aço e concreto, a função objetivo minimiza, Eq. (41), o custo total do pilar (por metro linear), sendo que a mesma engloba o custo do concreto, do perfil de aço e das armaduras utilizadas, sendo definida por:

$$f_{(\min)} = C_a A_a p_a + C_c A_c + C_s A_s p_s \quad (41)$$

Em que  $C_a$  é o custo do perfil de aço (R\$/kg),  $A_a$  é a área de aço total do perfil,  $p_a$  é o peso específico do aço (kg/m<sup>3</sup>),  $C_c$  é o custo do concreto (R\$/m<sup>3</sup>),  $A_c$  é a área de concreto na seção transversal do perfil de aço (m<sup>2</sup>),  $C_s$  é o custo das armaduras de aço (R\$/kg),  $A_s$  é a área das armaduras de aço (m<sup>2</sup>) e  $p_s$  é o peso específico das armaduras (kg/m<sup>3</sup>).

A partir disso, a solução ótima para a função objetivo é dada por meio de cálculos iterativos que alteram os valores das variáveis sucessivamente, até obter o ponto mínimo. Assim, os pilares mistos de seção tubular circular, Figura 6, possuem as seguintes variáveis de projeto:  $x_1 = D$ , referente ao diâmetro do perfil,  $x_2 = t$ , sendo a espessura do perfil,  $x_3 = f_{ck}$ , é a resistência característica do concreto a compressão e  $x_4 = A_s$ , a área das armaduras de aço. Já os pilares mistos de seção tubular retangular, Figura 6, possuem como variáveis de projeto:  $x_1 = b$ , referente a base do perfil,  $x_2 = h$ , sendo a altura do perfil,  $x_3 = t$  espessura do perfil,  $x_4 = f_{ck}$ , é a resistência característica do concreto a compressão e  $x_5 = A_s$ , a área das armaduras de aço. Para os pilares mistos de seção tubular quadrada, Figura 6, temos  $x_1 = b$ , referente ao base do perfil,  $x_2 = t$ , sendo a espessura do perfil,  $x_3 = f_{ck}$ , é a resistência característica do concreto a compressão e  $x_4 = A_s$ , a área das armaduras de aço.

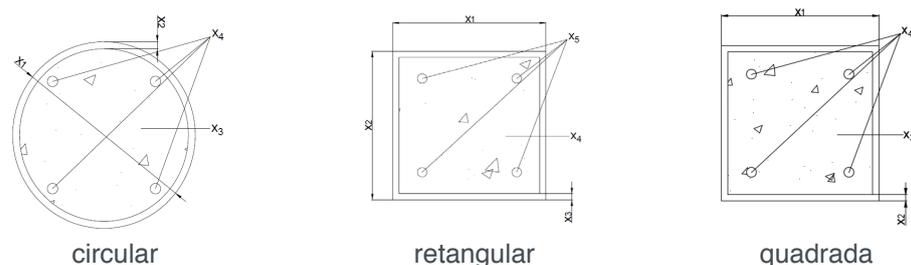


Figura 6 – Variáveis de projeto

A solução ótima deve atender às funções de restrições, as quais, em geral, são recomendações e exigências das normas de dimensionamento. As funções de restrições inseridas no programa foram as equações mencionadas nos Tópicos 2.3.1 e 2.3.2.

### 3.2 Dimensionamento otimizado probabilístico

A técnica de otimização usada para o problema de variável discreta, foi o Algoritmo Genético o qual determina o mínimo de uma função aptidão, Eq. (42), neste caso, o custo total do pilar misto preenchido de aço e concreto.

$$f_{\text{aptidão}}(X') = \begin{cases} X' \rightarrow X \\ f(X) = C_a A_a p_a + C_c A_c + C_s A_s p_s \end{cases} \quad (42)$$

A variável  $X'$  é um vetor com 8 variáveis para os casos de seção tubular circular e quadrada e um vetor com 9 variáveis para o caso de seção tubular retangular, onde todas possuem os valores de 0 ou 1, exclusivamente, para cada célula do vetor. Por fim, as restrições seguem o mesmo padrão que as funções de restrições para a otimização determinística, sendo obtidas nos Tópicos 2.3.1 e 2.3.2.

## 4 | EXEMPLOS

A interface gráfica foi desenvolvida com o auxílio do GUIDE (Graphical User Interface Development Environment), Figura 7, do *Matlab 2016a*. Nessa interface é possível fazer a verificação do perfil determinado pelo usuário quando selecionado as opções do método dos Pontos Interiores (IP) e o método da Programação Quadrática Sequencial (SQP) e Algoritmos Genéticos (AG).

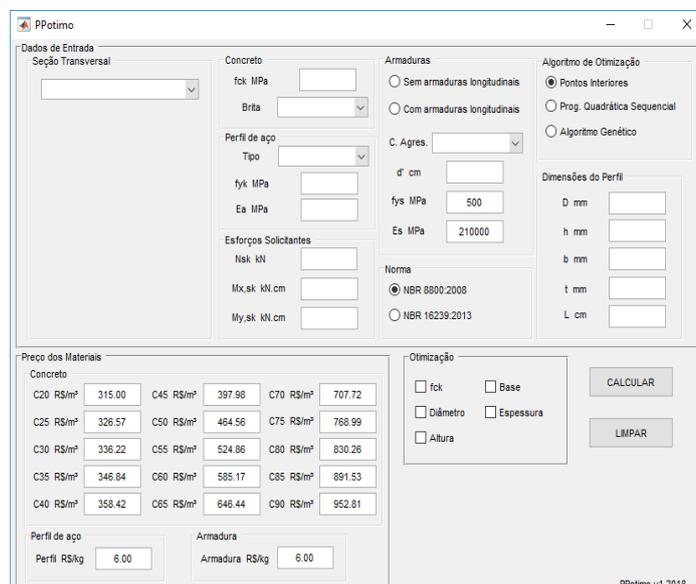


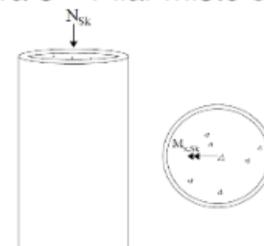
Figura 7 – Interface gráfica do software

#### 4.1 Pilar misto preenchido de perfil tubular circular

O primeiro exemplo é de um pilar misto preenchido composto por perfil tubular circular submetido a compressão axial e flexão oblíqua no eixo x, Figura 8, de solução dada por um software *PilarMisto 3.04.11* (CALDAS, FAKURY E SOUZA JR, 2018) utilizando a NBR 8800:2008. Dados do problema:

Diâmetro do perfil tubular = 323,80mm  
 Espessura do perfil tubular = 12,5mm  
 Comprimento do pilar misto = 4000mm  
 Resistência do concreto ( $f_{ck}$ ) = 30MPa  
 Limite de escoamento do aço ( $f_{yk}$ ) = 250MPa  
 Carregamento vertical ( $N_{Sk}$ ) = 1428,57kN  
 Momento na direção x ( $M_{x,Sk}$ ) = 9428,57kN  
 Momento na direção y ( $M_{y,Sk}$ ) = 0kN

Figura 8 – Pilar misto circular



A Tabela 2 apresenta os resultados quando se aplica as técnicas de otimização para este exemplo.

| Método              | D (mm) | t (mm) | $f_{ck}$ (MPa) | $N_{Rd}$ (kN) | $M_{x,Rd}$ (kN.cm) | $M_{y,Rd}$ (kN.cm) | FS1  | FS2  | CT (R\$) |
|---------------------|--------|--------|----------------|---------------|--------------------|--------------------|------|------|----------|
| Pilar Misto 3.04.11 | 323,8  | 12,5   | 30             | 3821          | 30611              | 30611              | 0,91 | 0,80 | -        |
| Dimensionamento IP  | 323,8  | 12,5   | 30             | 3836          | 30611              | 30611              | 0,90 | 0,87 | 2397     |
| SQP                 | 324,8  | 6,4    | 30             | 5136          | 19216              | 19216              | 1,00 | 0,76 | 1497     |
| AG                  | 324,8  | 6,4    | 30             | 5136          | 19216              | 19216              | 1,00 | 0,76 | 1497     |
|                     | 323,8  | 7,1    | 80             | 4865          | 20631              | 20631              | 0,98 | 0,80 | 1580     |

Tabela 2- Resultados das restrições dos softwares para o exemplo 1

Primeiramente, foi realizado o dimensionamento do pilar misto pelo programa, para efeito de validação do mesmo, o qual apresentou como resultado um aumento de 0,4% da força resistente de compressão axial quando comparado com o dimensionamento realizado pelo software *PilarMisto 3.04.11*. Isso pode ter ocorrido devido a alguma inconsistência na formulação das áreas de aço e de concreto, como também dos esforços resistentes. No entanto, não houve diferença entre os valores dos momentos resistentes em nenhum dos eixos. Já o fato de os fatores de segurança serem diferentes é devido ao fato de a força resistente de compressão possuir esse acréscimo de 0,4%.

Após, foi realizada a otimização desse pilar misto preenchido e os resultados encontrados pela otimização contínua, IP e SQP, apresentaram um perfil tubular de diâmetro superior, porém com uma espessura inferior ao do dimensionamento. Além disso, os dois métodos não apresentaram diferenças na solução. No entanto,

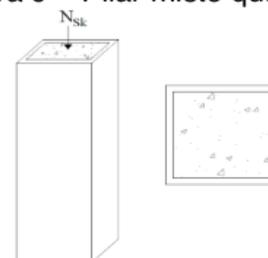
o resultado encontrado pela otimização discreta, AG, foi diferente devido a busca por um perfil padronizado por catálogos de tubos estruturais, neste caso, um perfil circular de dimensões externas 323,8x7,1mm, que ocasionou um custo elevado comparado com os algoritmos determinísticos, porém um custo menor em relação ao dimensionamento tradicional. Assim, o melhor resultado foi obtido pela otimização contínua, chegando numa diferença percentual de 37,5% quando comparado com a solução dada no dimensionamento. Contudo, não existe um perfil circular padronizado com tais dimensões externas.

#### 4.2 Pilar misto preenchido de perfil tubular quadrado

O segundo é um pilar misto preenchido de perfil tubular quadrado submetido a uma compressão axial, Figura 9, de solução dada pelo software PilarMisto 3.04.11 (CALDAS, FAKURY E SOUZA JR, 2018) utilizando a NBR 8800:2008. Dados do problema:

Base do perfil tubular = 150,00mm  
 Altura do perfil tubular = 150,00mm  
 Espessura do perfil tubular = 12,5mm  
 Comprimento do pilar misto = 3000mm  
 Resistência do concreto ( $f_{ck}$ ) = 30MPa  
 Limite de escoamento do aço ( $f_{yk}$ ) = 250MPa  
 Carregamento vertical ( $N_{Sk}$ ) = 714,29kN  
 Momento na direção x ( $M_{x,Sk}$ ) = 0kN  
 Momento na direção y ( $M_{y,Sk}$ ) = 0kN

Figura 9 – Pilar misto quadrado



A Tabela 3 apresenta os resultados tanto para o dimensionamento quanto para otimização aplicada neste exemplo.

| Método              | b (mm) | t (mm) | $f_{ck}$ (MPa) | $N_{Rd}$ (kN) | $M_{x,Rd}$ (kN.cm) | $M_{y,Rd}$ (kN.cm) | FS1  | FS2  | CT (R\$) |
|---------------------|--------|--------|----------------|---------------|--------------------|--------------------|------|------|----------|
| Pilar Misto 3.04.11 | 150,0  | 12,5   | 30             | 1555          | 8229               | 8229               | 0,00 | 0,00 | -        |
| Dimensionamento IP  | 150,0  | 12,5   | 30             | 1468          | 7780               | 7780               | 0,00 | 0,00 | 930      |
| SQP                 | 140,1  | 3,6    | 90             | 1000          | 2733               | 2733               | 0,00 | 0,00 | 324      |
| AG                  | 140,1  | 3,6    | 90             | 1000          | 2733               | 2733               | 0,00 | 0,00 | 324      |
|                     | 200    | 6,4    | 20             | 1381          | 8578               | 8578               | 0,00 | 0,00 | 710      |

Tabela 3- Resultados das restrições dos softwares para o exemplo 2

Novamente, realizou-se o dimensionamento pelo programa, o qual apresentou uma redução de 5,6% no resultado da força resistente de compressão axial, uma redução de 5,5% no resultado dos momentos resistentes no eixo x e no eixo y, quando comparados com o dimensionamento realizado pelo software PilarMisto 3.04.11,

podendo ser ocasionado devido a consideração dos raios externos e internos do perfil tubular.

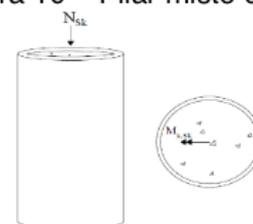
De forma similar ao exemplo anterior, foi realizado a otimização do pilar misto preenchido de seção tubular. Ambos os resultados encontrados pelo IP e SQP obtiveram um perfil tubular quadrado de dimensões externas reduzido, ocasionando uma redução no custo do pilar. Já, o resultado encontrado pelo AG, obteve um custo superior em relação aos algoritmos determinísticos devido a utilização de perfis padronizados por catálogos estruturais. Portanto, o melhor resultado foi obtido pela otimização contínua, com uma diferença percentual de 65,1% quando comparado com a solução dada no dimensionamento. Em relação ao AG o custo foi reduzido em 23,65% comparado com o dimensionamento tradicional.

#### 4.3 Pilar misto preenchido de perfil tubular circular

Neste exemplo, é dado um pilar misto preenchido de perfil tubular circular submetido a uma compressão axial e a flexão oblíqua no eixo x, Figura 10, de solução dada por Canales (2014) utilizando a NBR 16239:2013. Dados do problema:

Diâmetro do perfil tubular = 323,80mm  
 Espessura do perfil tubular = 10,3mm  
 Comprimento do pilar misto = 4000mm  
 Resistência do concreto ( $f_{ck}$ ) = 30MPa  
 Limite de escoamento do aço ( $f_{yk}$ ) = 250MPa  
 Carregamento vertical ( $N_{Sk}$ ) = 1428,57kN  
 Momento na direção x ( $M_{x,Sk}$ ) = 9428,57kN  
 Momento na direção y ( $M_{y,Sk}$ ) = 0kN

Figura 10 – Pilar misto circular



Na Tabela 4 apresenta os resultados tanto para o dimensionamento quanto para as soluções obtidas aplicando as formulações de otimização para o problema.

| Método          | D (mm) | t (mm) | $f_{ck}$ (MPa) | $N_{Rd}$ (kN) | $M_{x,Rd}$ (kN.cm) | $M_{y,Rd}$ (kN.cm) | FS3  | CT (R\$) |
|-----------------|--------|--------|----------------|---------------|--------------------|--------------------|------|----------|
| Canales (2014)  | 328,3  | 10,3   | 30             | 3430          | 26006              | 26006              | 0,88 | -        |
| Dimensionamento | 323,8  | 10,3   | 30             | 3722          | 26006              | 26006              | 0,75 | 2008     |
| IP              | 286,4  | 5,7    | 90             | 4377          | 13200              | 13200              | 1,00 | 1165     |
| SQP             | 286,4  | 5,7    | 90             | 4377          | 13200              | 13200              | 1,00 | 1165     |
| AG              | 273,0  | 6,4    | 90             | 4070          | 13234              | 13234              | 1,00 | 1212     |

Tabela 4- Resultados das restrições dos softwares para o exemplo 3

Para efeito de validação dos resultados, foi realizado o dimensionamento do pilar misto pelo programa, o qual apresentou um aumento de 8,5% no resultado da força resistente de compressão axial quando comparado com o dimensionamento realizado por Canales (2014) e uma diminuição no fator de segurança devido a força de resistente de compressão.

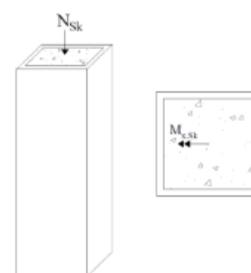
Após, realizou-se a otimização do pilar misto preenchido. Os métodos IP e SQP apresentaram uma redução no custo, visto que os métodos não se baseiam em perfis tubulares de catálogos estruturais. Já o resultado encontrado pelo AG obteve um custo mais alto, encontrando um perfil tubular circular de dimensões externas 273,0x6,4mm. Novamente, o melhor resultado foi obtido pela otimização contínua, chegando numa redução no custo final de 41,98% e em relação ao AG uma redução de 39,6%.

#### 4.4 Pilar misto preenchido de perfil tubular quadrado

É dado um pilar misto preenchido composto por perfil tubular quadrado submetido a compressão axial e flexão no eixo x, Figura 11, de solução dada por Canales (2014) utilizando a NBR 16239:2013. Dados do problema:

Base do perfil tubular = 290,00mm  
 Altura do perfil tubular = 290,00mm  
 Espessura do perfil tubular = 9,5mm  
 Comprimento do pilar misto = 4000mm  
 Resistência do concreto ( $f_{ck}$ ) = 30MPa  
 Limite de escoamento do aço ( $f_{yk}$ ) = 250MPa  
 Carregamento vertical ( $N_{Sk}$ ) = 1428,57kN  
 Momento na direção x ( $M_{x,Sk}$ ) = 9428,57kN  
 Momento na direção y ( $M_{y,Sk}$ ) = 0kN

Figura 11 – Pilar misto quadrado



De forma similar ao exemplo anterior, a Tabela 5 apresenta os resultados para o exemplo proposto.

| Método                         | b/h (mm) | t (mm) | $f_{ck}$ (MPa) | $N_{Rd}$ (kN) | $M_{x,Rd}$ (kN.cm) | $M_{y,Rd}$ (kN.cm) | FS3  | CT (R\$) |
|--------------------------------|----------|--------|----------------|---------------|--------------------|--------------------|------|----------|
| Canales (2014) Dimensionamento | 290,0    | 9,5    | 30             | 3400          | 27612              | 27612              | 0,89 | -        |
| IP                             | 239,8    | 5,9    | 90             | 3784          | 13200              | 13200              | 1,00 | 1221     |
| SQP                            | 239,8    | 5,9    | 90             | 3784          | 13200              | 13200              | 1,00 | 1221     |
| AG                             | 240      | 6,4    | 70             | 3341          | 13862              | 13862              | 0,95 | 1252     |

Tabela 5- Resultados das restrições dos softwares para o exemplo 4

Novamente, o dimensionamento do pilar misto foi realizado pelo programa, o qual apresentou um aumento de 7,7% no resultado da força resistente de compressão axial quando comparado com o dimensionamento realizado por Canales (2014) e uma diminuição no fator de segurança devido a força de resistente de compressão. Isso pode ter ocorrido devido ao fato de consideramos o valor do raio externo e interno dos perfis tubulares como sendo duas vezes a espessura e uma vez a espessura, respectivamente.

De forma similar aos exemplos anteriores, os resultados encontrados pelo IP e SQP, apresentaram mesma solução, obtendo um pilar misto de custo reduzido. Já,

o resultado encontrado pelo AG obteve um custo relativamente superior devido a utilização de perfis padronizados. Assim, a otimização contínua obteve uma redução final no custo do pilar de 41,66% e em relação ao AG uma redução de custo de 39,3%.

## 5 | CONCLUSÕES

Conforme os exemplos apresentados, os resultados encontrados pela otimização contínua, método dos pontos interiores e programação quadrática sequencial, convergiram para uma mesma solução em todos os exemplos, apontando que a solução encontrada em torno dessas dimensões é a solução otimizada do problema. Já a otimização discreta obteve soluções com custos superiores aos encontrados pela otimização contínua, devido a utilização de perfis padronizados por catálogos de tubos estruturais e efetivamente a que será utilizada. No mais, prevê-se a adição de mais catálogos de perfis comerciais ao programa, a fim de buscar o dimensionamento otimizado em variadas situações.

No mais, realizar o dimensionamento otimizado de pilares mistos preenchidos frente as solicitações impostas ao mesmo, possibilita ao profissional uma análise mais analítica para a escolha do tipo de perfil tubular, bem como as dimensões deste elemento estrutural e a resistência do concreto, garantindo assim uma redução de valores expressivos para o seu custo total.

## REFERÊNCIAS

Associação Brasileira De Normas Técnicas. ABNT, NBR 8800: *Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios*, 2008.

Associação Brasileira De Normas Técnicas. ABNT, NBR 16239: *Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edificações com perfis tubulares*, 2013.

Caldas, R. B; Fakury, R. H.; Souza Jr; J. B. M. **PilarMisto 3.04.11: verificação de pilares mistos de aço e concreto segundo a ABNT NBR 8800:2008 e a NBR 14323:2010**. Belo Horizonte: UFMG, Departamento de Engenharia de Estruturas. Acesso em: 26 julho 2018.

Canales, A. F. 2014. **Estudo do dimensionamento de pilares de aço tubulares e pilares mistos de perfis tubulares preenchidos com concreto de acordo com a ABNT NBR 16239:2013**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão.

Fernandes, J. 1997. **Pilares mistos: tubos de aço com seções quadradas e retangulares e núcleo de concreto de alta resistência**. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil) – Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas.

De Nardin, S. 1999. **Estudo teórico-experimental de pilares mistos compostos por tubos de aço preenchidos com concreto de alta resistência**. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

De Nardin, S. 2003. **Pilares mistos preenchidos: estudo da flexo-compressão e de ligações viga-pilar**. Tese (Doutor em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São

Paulo.

Oliveira, W. 2008. **Análise teórico-experimental de pilares mistos preenchidos de seção circular.** Tese (Doutor em Engenharia de Estruturas) – Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Carlos.

Vallourec Tubos Do Brasil: Tubos estruturais seção circular, quadrada e retangular. Minas Gerais: Belo Horizonte, 2017. 56 p. Catálogo estrutural.

Agência Brasileira do ISBN  
ISBN 978-85-7247-430-6



9 788572 474306