

COLEÇÃO

DESAFIOS DAS ENGENHARIAS:

ENGENHARIA CIVIL 3



ARMANDO DIAS DUARTE
(ORGANIZADOR)

Atena
Editora
Ano 2021

COLEÇÃO
DESAFIOS
DAS
ENGENHARIAS:

ENGENHARIA CIVIL 3



ARMANDO DIAS DUARTE
(ORGANIZADOR)

Atena
Editora
Ano 2021

Editora chefe

Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Editora executiva

Natalia Oliveira

Assistente editorial

Flávia Roberta Barão

Bibliotecária

Janaina Ramos

Projeto gráfico

Camila Alves de Cremo

Daphynny Pamplona

Luiza Alves Batista

Maria Alice Pinheiro

Natália Sandrini de Azevedo

Imagens da capa

iStock

Edição de arte

Luiza Alves Batista

2021 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do texto © 2021 Os autores

Copyright da edição © 2021 Atena Editora

Direitos para esta edição cedidos à Atena Editora pelos autores.

Open access publication by Atena Editora



Todo o conteúdo deste livro está licenciado sob uma Licença de Atribuição *Creative Commons*. Atribuição-Não-Comercial-NãoDerivativos 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0).

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores, inclusive não representam necessariamente a posição oficial da Atena Editora. 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.

Todos os manuscritos foram previamente submetidos à avaliação cega pelos pares, membros do Conselho Editorial desta Editora, tendo sido aprovados para a publicação com base em critérios de neutralidade e imparcialidade acadêmica.

A Atena Editora é comprometida em garantir a integridade editorial em todas as etapas do processo de publicação, evitando plágio, dados ou resultados fraudulentos e impedindo que interesses financeiros comprometam os padrões éticos da publicação. Situações suspeitas de má conduta científica serão investigadas sob o mais alto padrão de rigor acadêmico e ético.

Conselho Editorial

Ciências Exatas e da Terra e Engenharias

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

Profª Drª Ana Grasielle Dionísio Corrêa – Universidade Presbiteriana Mackenzie

Prof. Dr. Carlos Eduardo Sanches de Andrade – Universidade Federal de Goiás

Profª Drª Carmen Lúcia Voigt – Universidade Norte do Paraná

Prof. Dr. Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

Prof. Dr. Douglas Gonçalves da Silva – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Profª Drª Érica de Melo Azevedo – Instituto Federal do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará
Profª Dra. Jéssica Verger Nardeli – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho
Prof. Dr. Juliano Carlo Rufino de Freitas – Universidade Federal de Campina Grande
Profª Drª 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. Dr. Marco Aurélio Kistemann Junior – Universidade Federal de Juiz de Fora
Profª Drª Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Profª Drª Priscila Tessmer Scaglioni – Universidade Federal de Pelotas
Prof. Dr. Sidney Gonçalo de Lima – Universidade Federal do Piauí
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista

Diagramação: Maria Alice Pinheiro
Correção: Maiara Ferreira
Indexação: Gabriel Motomu Teshima
Revisão: Os autores
Organizador: Armando Dias Duarte

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

D812 Coleção desafios das engenharias: engenharia civil 3 /
Organizador Armando Dias Duarte. – Ponta Grossa -
PR: Atena, 2021.

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

Inclui bibliografia

ISBN 978-65-5983-639-0

DOI: <https://doi.org/10.22533/at.ed.390212610>

1. Engenharia civil. I. Duarte, Armando Dias. II. Título.
CDD 624

Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166

Atena Editora

Ponta Grossa – Paraná – Brasil

Telefone: +55 (42) 3323-5493

www.atenaeditora.com.br

contato@atenaeditora.com.br

DECLARAÇÃO DOS AUTORES

Os autores desta obra: 1. Atestam não possuir qualquer interesse comercial que constitua um conflito de interesses em relação ao artigo científico publicado; 2. Declaram que participaram ativamente da construção dos respectivos manuscritos, preferencialmente na: a) Concepção do estudo, e/ou aquisição de dados, e/ou análise e interpretação de dados; b) Elaboração do artigo ou revisão com vistas a tornar o material intelectualmente relevante; c) Aprovação final do manuscrito para submissão.; 3. Certificam que os artigos científicos publicados estão completamente isentos de dados e/ou resultados fraudulentos; 4. Confirmam a citação e a referência correta de todos os dados e de interpretações de dados de outras pesquisas; 5. Reconhecem terem informado todas as fontes de financiamento recebidas para a consecução da pesquisa; 6. Autorizam a edição da obra, que incluem os registros de ficha catalográfica, ISBN, DOI e demais indexadores, projeto visual e criação de capa, diagramação de miolo, assim como lançamento e divulgação da mesma conforme critérios da Atena Editora.

DECLARAÇÃO DA EDITORA

A Atena Editora declara, para os devidos fins de direito, que: 1. A presente publicação constitui apenas transferência temporária dos direitos autorais, direito sobre a publicação, inclusive não constitui responsabilidade solidária na criação dos manuscritos publicados, nos termos previstos na Lei sobre direitos autorais (Lei 9610/98), no art. 184 do Código Penal e no art. 927 do Código Civil; 2. Autoriza e incentiva os autores a assinarem contratos com repositórios institucionais, com fins exclusivos de divulgação da obra, desde que com o devido reconhecimento de autoria e edição e sem qualquer finalidade comercial; 3. Todos os e-book são *open access*, desta forma não os comercializa em seu site, sites parceiros, plataformas de *e-commerce*, ou qualquer outro meio virtual ou físico, portanto, está isenta de repasses de direitos autorais aos autores; 4. Todos os membros do conselho editorial são doutores e vinculados a instituições de ensino superior públicas, conforme recomendação da CAPES para obtenção do Qualis livro; 5. Não cede, comercializa ou autoriza a utilização dos nomes e e-mails dos autores, bem como nenhum outro dado dos mesmos, para qualquer finalidade que não o escopo da divulgação desta obra.

APRESENTAÇÃO

A coleção de trabalhos intitulada “Coleção desafios das engenharias: Engenharia Civil 3” é uma obra que tem como foco principal a discussão científica por intermédio de trabalhos diversos que compõe seus capítulos. O volume abordará de forma categorizada e interdisciplinar trabalhos, pesquisas, relatos de casos e/ou revisões que através dos resultados, possam auxiliar na tomada de decisão, tanto no campo acadêmico, quanto no desenvolvimento profissional.

Os estudos apresentados, foram desenvolvidos em diversas instituições de ensino e pesquisa do país e também um caso internacional. Em todos esses trabalhos foram apresentadas diversas problemáticas a respeito do estudo de interação solo-estrutura, orçamento de obras, desempenho de materiais, aditivos para materiais da construção civil, análises através da ferramenta Building Information Modelling (BIM), gestão de resíduos **sólidos**, entre outros. Os estudos presentes nos trazem à tona, temas interdisciplinares através da segurança de obras civis, aspectos econômicos, sociais e ambientais.

Os temas discutidos nesta obra, possuem a proposta de fundamentar o conhecimento de acadêmicos, mestres e todos aqueles que de alguma forma se interessam pela área da Engenharia Civil, com temáticas atuais e que são apresentadas como desafios enfrentados pelos profissionais e acadêmicos, deste modo a obra “Coleção desafios das engenharias: Engenharia Civil 3”, apresenta uma teoria fundamentada nos resultados práticos obtidos pelos diversos professores e acadêmicos que desenvolveram seus trabalhos e pesquisas, os quais serão apresentados de maneira concisa e didática.

A divulgação científica é de suma importância para o desenvolvimento de toda uma nação, portanto, fica evidenciada a responsabilidade de transmissão dos saberes através de plataformas consolidadas e confiáveis, sendo a Atena Editora, capaz de oferecer uma maior segurança para os novos pesquisadores e os que já atuam nas diferentes áreas de pesquisa, exporem e divulguem seus resultados.

Armando Dias Duarte

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1..... 1

ANÁLISE DA INTERAÇÃO SOLO-ESTRUTURA EM EDIFICAÇÕES DE CONCRETO ARMADO SOBRE FUNDAÇÕES SUPERFICIAIS

Mateus Lima Barros

Vinicius Costa Correia

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.3902126101>

CAPÍTULO 2..... 13

ANÁLISE DE HASTES DELGADAS EM GRELHAS HIPERESTÁTICAS

Antônio Luís Alves da Cunha

Luiz Carlos Mendes

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.3902126102>

CAPÍTULO 3..... 28

ANÁLISE DE SÓLIDOS INELÁSTICOS SOB DEFORMAÇÃO FINITA USANDO ELEMENTOS BIARTICULADOS 2D E 3D

William Taylor Matias Silva

Sebastião Simão da Silva

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.3902126103>

CAPÍTULO 4..... 46

APLICAÇÃO DA NORMA ABNT NBR 16747 (2020) – INSPEÇÃO PREDIAL EM EMPREENDIMENTOS RURAIS – ESTUDO DE CASO

Camilla Cristina Cunha Menezes

Marcos de Paulo Ramos

Thiago Pena Bortone

Rachel Jardim Martini

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.3902126104>

CAPÍTULO 5..... 58

APLICAÇÃO DE CURSO EXTENSÃO DE ORÇAMENTO DE OBRAS EM BIM COMPARANDO COM A METODOLOGIA ATUAL DA DISCIPLINA DE ORÇAMENTO DE OBRAS DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL DO INSTITUTO FEDERAL DE SERGIPE – CAMPUS ESTÂNCIA

Anna Cristina Araujo de Jesus Cruz

José Carlos de Anunciação Cardoso Júnior

Mariana Silveira Araujo

Natália Ramos dos Santos

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.3902126105>

CAPÍTULO 6..... 67

CORROSÃO NA ARMADURA EM ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO DEVIDO AO ATAQUE DE SULFATOS

Henrique Resende dos Santos

Adriano de Paula e Silva

Eduardo Chahud
Cristiane Machado Parisi Jonov

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.3902126106>

CAPÍTULO 7..... 78

DANOS PÓS INCÊNDIO NA ESTRUTURA DE UMA SUBESTAÇÃO ELÉTRICA. UM ESTUDO DE CASO NA UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

Rodolpho Medeiros Frossard
Anna Luiza Macachero Victor Rodrigues
Lara Sandrini
Matheus Carreiro Zani
Warribe Lima de Siqueira
Geilma Lima Vieira

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.3902126107>

CAPÍTULO 8..... 90

DEGRADAÇÃO TÉRMICA DE CONCRETOS CONVENCIONAIS SUBMETIDOS A ALTAS TEMPERATURAS E RESFRIAMENTO LENTO

Moacyr Salles Neto
Flávio Roldão de Carvalho Lelis

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.3902126108>

CAPÍTULO 9..... 103

DESEMPENHO DE EDIFICAÇÕES HOSPITALARES VIA DIMENSÕES MORFOLÓGICAS

Alyria Donegá
João da Costa Pantoja

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.3902126109>

CAPÍTULO 10..... 115

DIFICULDADE DOS DISCENTES DE ENGENHARIA CIVIL NA MATÉRIA DE MECÂNICA VETORIAL COMPARANDO OS PARÂMETROS DO ENSINO PRESENCIAL E DO ENSINO REMOTO

Alessandro Leonardo da Silva
Emanuela dos Santos Gonzaga
Gustavo Neves Quintão Gonzales
Marcelo Robert Fonseca Gontijo
Thais Prado Vasconcelos Silva
Rodrigo Silva Fonseca
Heron Viterbre Debique Sousa
Ícaro Viterbre Debique Sousa

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.39021261010>

CAPÍTULO 11..... 125

EFEITO DO TEOR e TIPO de CIMENTO NO MÓDULO DE RESILIÊNCIA DE SOLO ARENOSO ESTABILIZADO QUIMICAMENTE

José Wilson dos Santos Ferreira
Michéle Dal Toé Casagrande

Raquel Souza Teixeira

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.39021261011>

CAPÍTULO 12..... 136

ESTUDIOS DE PELIGRO SÍSMICO EN EL MUNICIPIO DE IXHUACÁN DE LOS REYES, VERACRUZ

Gilbert Francisco Torres Morales

Ignacio Mora González

Saúl Castillo Aguilar

René Álvarez Lima

Raymundo Dávalos Sotelo

José Alberto Aguilar Cobos

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.39021261012>

CAPÍTULO 13..... 150

ESTUDO DA APLICAÇÃO DO LÁTEX DA SERINGUEIRA AMAZÔNICA (*HEVEA BRASILIENSIS*) COMO ADITIVO EM ARGAMASSA COM CIMENTO PORTLAND PARA MELHORA DE COMPORTAMENTO MECÂNICO

José Costa Feitoza

Natália da Mata Batista

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.39021261013>

CAPÍTULO 14..... 160

ESTUDO DE UMA CONTENÇÃO UTILIZANDO FERRAMENTA NUMÉRICA E MÉTODOS APROXIMADOS DE DIMENSIONAMENTO DE TIRANTES

Renathielly Fernanda da Silva Brunetta

Isabela Grossi da Silva

Leandro Canezin Guideli

Vitor Pereira Faro

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.39021261014>

CAPÍTULO 15..... 173

AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DO TRATAMENTO TÉRMICO NO GNAISSE MILONÍTICO

Kelly de Oliveira Borges da Costa

Afonso Rangel Garcez de Azevedo

Carlos Maurício Fontes Vieira

Elaine Aparecida Santos Carvalho Costa

Geovana Carla Girondi Delaqua

Gustavo de Castro Xavier

Letícia Borges da Costa

Vinícius Alves Polinicola

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.39021261015>

CAPÍTULO 16..... 183

VIGAS DE GRAN ALTURA DE HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS. EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA AL CORTE

Viviana Carolina Rougier

Miqueas Ceferino Denardi
Dario Orestes Vercesi

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.39021261016>

CAPÍTULO 17..... 195

GESTÃO E OPERAÇÃO DE SISTEMAS DE AR CONDICIONADO: UMA NOVA ABORDAGEM USANDO MODELAGEM 6D

João Bosco Pinheiro Dantas Filho
Guilherme Bruno de Souza Ribeiro
Pedro Holanda
Bruna Vital Roque
Rodrigo G. Ribeiro
Artur de Almeida Evangelista

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.39021261017>

CAPÍTULO 18..... 206

GRANULOMETRIA DOS AGREGADOS GRAÚDOS COMERCIALIZADOS NOS MUNICÍPIOS DA CHAPADA DO APODI/RN – ANÁLISE COMPARATIVA COM A NORMA NBR 7211/2009

Renata Samyla Matias Nogueira
Clélio Rodrigo Paiva Rafael
Edna Lucia da Rocha Linhares
Ronald Assis Fonseca
Rokátia Lorrany Nogueira Marinho
Ligia Raquel Rodrigues Santos
Jaiana de Araújo Pinheiro
Carlos Eduardo Carvalho Oliveira
Edyelly Cristtian Galdino Fernandes
Francisco Felinto de Lima Neto
Luzianne Galvão Pimenta
Géssica de Moura Ribeiro

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.39021261018>

CAPÍTULO 19..... 221

INSPEÇÃO PREDIAL EM EMPREENDIMENTOS RURAIS APLICABILIDADE DA NBR 16747

Camilla Cristina Cunha Menezes
Marcos de Paulo Ramos
Thiago Pena Bortone
Rachel Jardim Martini

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.39021261019>

CAPÍTULO 20..... 232

GESTÃO INTEGRADA DE RESÍDUOS SÓLIDOS

Wallace Ribeiro Nunes Neto
Camila Moraes Silva
Pedro Paulo Barbosa Nunes Sobrinho

Carlos Augusto Rocha de Moraes Rego
Louryval Coelho Paixão
Marcio Mendes Cerqueira

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.39021261020>

CAPÍTULO 21..... 241

LOCUS SAECULARIS: MATERIAIS QUE CONSTRÍRAM UMA TRADIÇÃO

João Hermem Fagundes Tozatto
Crystian André Montozo Botelho

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.39021261021>

CAPÍTULO 22..... 253

MODELAGEM NUMÉRICA DE PAREDE DIAFRAGMA ATIRANTADA EM ÁREA URBANA

Isabela Grossi da Silva
Renathielly Fernanda da Silva Brunetta
Leandro Canezin Guideli
Vitor Pereira Faro

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.39021261022>

CAPÍTULO 23..... 266

NOVA TECNOLOGIA DE CONSTRUÇÃO DE TORRES EÓLICAS

Ilo Borba

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.39021261023>

CAPÍTULO 24..... 273

O CORREDOR BIOCEÂNICO: REESTRUTURAÇÃO TERRITORIAL DE NOVAS HINTERLÂNDIAS

Carlos Andrés Hernández Arriagada
Teo Felipe Bruder Gouveia

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.39021261024>

CAPÍTULO 25..... 287

O MAPA DE DANOS COMO FERRAMENTA DE MANUTENÇÃO E RESTAURO DE EDIFICAÇÕES: UMA REVISÃO LITERÁRIA

Lucas Rodrigues Cavalcanti
Eliana Cristina Barreto Monteiro
Carlos Fernando Gomes do Nascimento
Catharina Silveira Rodrigues
Fabrício Fernando de Souza Lima
Amanda de Moraes Alves Figueira
José Maria de Moura Júnior
Sabrina Santiago Oliveira
Roberto Revoredo de Almeida Filho
Flávio Matheus de Moraes Cavalcante

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.39021261025>

CAPÍTULO 26	302
TREINAMENTO DE REDES NEURAIS ARTIFICIAIS PARA O DIMENSIONAMENTO À FLEXÃO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO	
João Victor Fernandes Masalkas	
Emerson Felipe Felix	
 https://doi.org/10.22533/at.ed.39021261026	
CAPÍTULO 27	316
UMA FORMULAÇÃO ANALÍTICA PARA DETECÇÃO DE PONTOS LIMITES E DE BIFURCAÇÃO	
William Taylor Matias Silva	
Sebastião Simão da Silva	
 https://doi.org/10.22533/at.ed.39021261027	
CAPÍTULO 28	333
UTILIZAÇÃO DO CARVÃO OBTIDO A PARTIR DA PIRÓLISE DA CASCA DE ARROZ PARA ADSORÇÃO DE AZUL DE METILENO	
Camila Ribeiro Rodrigues	
Marcelo Mendes Pedroza	
Mayara Shelly Miranda Bequimam	
David Barbosa Dourado	
Danielma Silva Maia	
Marcel Sousa Marques	
Hellen Dayany Barboza Barros	
 https://doi.org/10.22533/at.ed.39021261028	
SOBRE O ORGANIZADOR	338
ÍNDICE REMISSIVO	339

I REINAMENTO DE REDES NEURAIS ARTIFICIAIS PARA O DIMENSIONAMENTO À FLEXÃO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO

Data de aceite: 01/10/2021

Data de submissão: 24/06/2021

João Victor Fernandes Masalkas

Graduando, Centro Universitário Estácio de
Ribeirão Preto
Ribeirão Preto – São Paulo
<http://lattes.cnpq.br/0880499229095573>

Emerson Felipe Felix

Professor, Centro Universitário Estácio de
Ribeirão Preto
Ribeirão Preto – São Paulo
<http://lattes.cnpq.br/8352527462118419>

RESUMO: Nos últimos anos as redes neurais artificiais vêm sendo empregadas em diversas linhas da área de estruturas, a exemplo do projeto e análise de componentes estruturais, estudo de otimização estrutural, análise dinâmica de estruturas, impacto de terremotos e, no monitoramento de riscos e danos. Assim, devido à crescente utilização de redes neurais artificiais, o presente trabalho tem o intuito de avaliar a aplicabilidade dessa ferramenta numérica, no desenvolvimento de modelos automatizados de dimensionamento de estruturas de concreto armado. Como estudo de caso, neste trabalho é apresentado o treinamento de redes neurais artificiais do tipo Multi-Layer Perceptron para determinar a taxa de armadura longitudinal de vigas de concreto armado, de seção retangular, submetidas à flexão simples. Os resultados encontrados demonstraram a potencialidade

das redes em determinar a taxa de armadura das vigas, e que o emprego das redes apresenta uma ferramenta viável e eficiente para dimensionamento de estruturas de concreto armado.

PALAVRA - CHAVE: Estruturas de concreto armado, dimensionamento à flexão, Inteligência Artificial, Redes neurais artificiais.

ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS TRAINING TO DESIGN REINFORCED CONCRETE BEAMS SUBJECT TO BENDING MOMENT

ABSTRACT: In recent years, artificial neural networks have been used in several lines in structures areas, such as the design and analysis of structural components, study of structural optimization, dynamic analysis of structures, earthquake impact and, in the monitoring of risks and damages. Thus, due to the growing use of artificial neural networks, this work aims to evaluate the applicability of this numerical tool to develop automated design models of reinforced concrete structures. As a case study, this work presents the training of MLP artificial neural networks to determine the longitudinal reinforcement ratio of reinforced concrete beams, considering beams with rectangular section, submitted to simple bending moment. The results point out the potential of the artificial neural networks to determine the reinforcement ratio, and the use of the networks to presents a viable and efficient tool for the design of reinforced concrete structures.

KEYWORDS: Reinforced concrete structures, bending moment design, Artificial Intelligence,

1 | INTRODUÇÃO

No Brasil as estruturas são em grande parte, produzidas de concreto armado. De acordo com Forde (1993), o concreto é o material mais utilizado no mundo, na produção de estruturas e outras obras de infraestrutura.

O dimensionamento eficiente e seguro de uma estrutura de concreto armado, deve ser feita empregando os códigos prescritivos de normas nacionais e/ou internacionais. No Brasil a norma que regulamenta e fornece recomendações para o dimensionamento de estruturas de concreto armado é a NBR 6118 (ABNT, 2014).

As normas apresentam formulações analíticas que indicam os processos de cálculo e verificação no dimensionamento dos diferentes elementos estruturais. No entanto, os processos de cálculo em modo manual, demandam grande tempo, a depender da dimensão do projeto. De modo a otimizar o processo de cálculo e projeto de estruturas, atualmente existem softwares que possibilitam o dimensionamento de forma automatizada, mas que mantém as recomendações dos códigos normativos, a fim de garantir a segurança necessária ao projeto.

Com o advento da computação, e do grande poder de processamento dos computadores, atualmente a utilização de ferramentas computacionais, como o aprendizado de máquina, e em especial, das redes neurais artificiais, apresentam-se como uma alternativa viável e eficaz para contornar as dificuldades impostas no processo de cálculo e dimensionamento das estruturas, uma vez que estas redes vêm demonstrando grande aplicabilidade quanto à modelagem de diferentes problemas, sejam eles físicos, químicos ou naturais (BONINI NETO et al., 2017). Isso se deve à capacidade das redes de mapear e modelar problemas complexos e não lineares (FELIX et al., 2021).

Uma das razões pela qual as RNA são atualmente conhecidas e empregadas remete-se a utilização do algoritmo de treinamento backpropagation (RUMELHART et al., 1986), que pode ser facilmente implementado baseando-se na técnica de otimização via gradiente descendente. Devido a simplicidade da técnica, a maior parte dos trabalhos desenvolvidos e publicados na área da engenharia civil, que fazem o uso de RNA, utilizam o algoritmo backpropagation no treinamento das redes (ADELI, 2001; LAZAREVSKA et al., 2014; SHAFABAKHSH et al., 2015; FELIX et al., 2019; ABAMBRES; LANTSOGHT, 2019).

A primeira publicação que trata da aplicação da técnica de aprendizado de máquinas na engenharia civil, foi feita por Adeli e Yeh (1989). Os autores apresentaram a aplicação de redes neurais artificiais do tipo Perceptron (redes sem camadas ocultas) para criar um modelo de projeto de vigas de aço. A partir deste marco, muitos trabalhos vêm sendo desenvolvidos e publicados em toda parte do mundo, sendo a maioria destes, centrados no reconhecimento de padrões e mapeamento de funções.

As áreas de estruturas e materiais, são as que mais apresentam aplicações das redes neurais artificiais dentro da engenharia civil. A utilização da técnica de aprendizado de máquinas é vista desde a publicação de Adeli e Yeh (1989).

Na área de estruturas, as redes vêm sendo empregadas para o projeto e análise de componentes estruturais (KANG; YOON, 1994; KUSHIDA et al., 1997; GU et al., 2010), no estudo de otimização estrutural (HAJELA; BERKE, 1991; ROGERS, 1994, JENKINS, 1999; BABIKER, 2012), análise dinâmica de estruturas e impacto de terremotos (ADELI, 1994; CHEN et al., 1995; STAVROULAKIS; ANTES 1998; VAFAEI et al., 2013; AL-SUHAILI et al., 2014) e, no monitoramento de riscos e danos (WU et al., 1992; ABBAS; KHAN, 2016).

Assim, devido à crescente utilização de RNA, o presente trabalho tem o intuito de avaliar a aplicabilidade de redes neurais artificiais, no desenvolvimento de modelos automatizados de dimensionamento de estruturas de concreto armado. Como estudo de caso, neste trabalho é apresentado o treinamento de redes neurais artificiais do tipo Multi-Layer Perceptron para determinar a taxa de armadura longitudinal de vigas de concreto armado, de seção retangular, submetidas à flexão simples.

2 I DIMENSIONAMENTO À FLEXÃO SIMPLES DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO

A capacidade portante de uma viga retangular de concreto armado depende de muitos fatores, a exemplo da altura (h), seção transversal (b_w) do elemento, resistência característica do concreto (F_{ck}), tipo de aço utilizado, taxas de armadura longitudinal e transversal e da geometria.

Para realizar o dimensionamento a flexão de vigas de concreto armado, no Brasil, segue-se as recomendações prescritas na norma NBR 6118 (ABNT, 2014), que indica por exemplo, os valores mínimos da relação água/cimento do concreto, da resistência à compressão do concreto e do cobrimento nominal. Estes valores são associados às classes de agressividade do ambiente circundante ao qual a estrutura será executada, e visa garantir vida útil adequada aos elementos estruturais.

Ao iniciar o processo de cálculo e dimensionamento de uma viga de concreto armado, utilizando a NBR 6118 (2014), faz-se necessário levantar todas as ações permanentes e ações variáveis ao qual a estrutura estará sujeita ao longo de sua vida, e para isso deve-se recorrer aos preceitos da NBR 6120 (ABNT, 2019).

Quanto as características geométricas da viga, não existe uma forma direta para se encontrar suas dimensões. Segundo NBR 6118 (ABNT, 2014), a seção transversal de uma viga (b_w) não deve ser inferior a 12 cm e, em caso excepcionais, não deve ser inferior a 10 cm. No geral, a largura da viga é definida no projeto arquitetônico. Já a altura do elemento (h) pode ser estimada através da Equação 1.

$$h = \frac{L}{10} \quad \text{(Equação 1)}$$

em que h é a altura da seção (em m), e L é o vão livre (em m).

A princípio não se sabe qual a taxa de armadura que se faz necessário para a estrutura, assim, deve-se inicialmente indicar um diâmetro para a armadura, e ao final, caso seja necessário, deve-se alterar esse diâmetro e atualizar os cálculos. De posse do diâmetro escolhido, deve-se calcular as dimensões características da seção transversal (Figura 1), como a altura útil, utilizando a Equação 2.

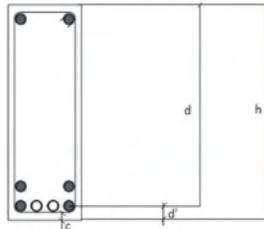


Figura 1 – Seção transversal de uma viga retangular.

$$d = h - d' \quad \text{(Equação 2)}$$

$$d' = c + \phi t + 0,5 * \phi l \quad \text{(Equação 3)}$$

em que d é a altura útil da seção (m), h é a altura da viga (m), d' distância entre o centro de gravidade da armadura longitudinal comprimida e a face mais próxima do elemento estrutural (m), c é o cobrimento (m), ϕt é o diâmetro da armadura transversal (m) e ϕl é o diâmetro da armadura longitudinal.

Para o dimensionamento à flexão, faz-se necessário determinar os momentos resistente e solicitante. O momento solicitante é obtido ao avaliar as cargas que irão incidir sobre a estrutura e seu valor deve ser majorado em função da segurança, de acordo como recomenda a NBR 6118 (ABNT,2014). Para a determinação do momento resistente, utiliza-se a Equação 3, que indica o momento de dimensionamento, e considera as forças que geram esforços internos no material.

$$M_d = (0,85 * f_{cd} * b_x * 0,8 * x) * (d - 0,4 * x) \quad \text{(Equação 4)}$$

em que em que f_{cd} é a resistência de cálculo a compressão do concreto (kN/m^2), b_w é a largura da seção transversal da viga (m), d é a altura útil e x é a profundidade da linha neutra (m) na seção, que se refere à distância da borda mais comprimida do concreto ao ponto que tem deformação e tensões nulas, ponto esse denominado de linha neutra. A posição da linha neutra é dada pela Equação 5.

$$x = \frac{d \pm \sqrt{\left(d^2 - 2 * \left(\frac{M_d}{b_w * \alpha * c * f_{cd}}\right)\right)}}{\lambda} \quad \text{(Equação 5)}$$

em que x é a profundidade da linha neutra (m), M_d momento de dimensionamento (kN.m), $\alpha c = 0,85$ e $\lambda = 0,8$ para concretos com f_{ck} inferior ou igual a 50 MPa.

Por fim, com o valor da linha neutra torna-se possível encontrar a taxa de armadura (área de aço - A_s) necessária para resistir aos esforços solicitantes de tração, conforme indicado na Equação 6.

$$A_s = \frac{M_d}{z * f_{yd}} \quad \text{(Equação 6)}$$

em que A_s é a área de aço (m²), z é o braço de alavanca (m) e f_{yd} é a resistência do aço (kN/m²).

3 | REDES NEURAIS ARTIFICIAIS

As Redes Neurais Artificiais (RNA) são estruturas inspiradas no cérebro humano e podem ser definidas como sistemas paralelos e distribuídos, compostos por unidades de processamento, os neurônios. Estas redes possuem a propriedade de aproximar funções matemáticas não lineares com alta generalidade (HAYKIN, 2001).

As RNA demonstram uma capacidade que vai além da função de mapear relações entre entradas e saída; elas são capazes também de extrair informações não apresentadas à rede, fazendo interpolação dos resultados. O funcionamento destas redes tem como inspiração o cérebro humano (BRAGA et al., 2000), em que os neurônios são dispostos em uma ou mais camadas, interligadas por meio de conexões associadas a pesos sinápticos que possuem a propriedade de armazenar conhecimento (Figura 2.a).

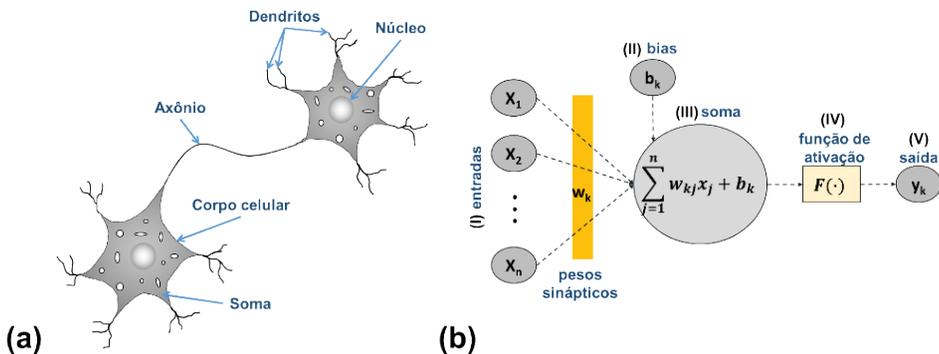


Figura 2 – Representação de (a) uma rede biológica e (b) uma rede artificial. (FELIX et al., 2019).

Haykin (2001) relata que as RNA são constituídas por cinco elementos básicos, e que se assemelham às redes biológicas, sendo: (I) um conjunto de entrada, X , onde cada entrada carrega o seu respectivo peso sináptico, w_k ; (II) um somador, Σ , para somar os sinais de entrada, ponderados pelos respectivos pesos sinápticos; (III) uma função de ativação, $F(\cdot)$, para restringir a amplitude da saída; (IV) um bias, b_k , responsável por aumentar ou diminuir a entrada líquida da função de ativação (equivalente a uma translação horizontal do gráfico da função de ativação); (V) uma saída gerada pela rede, y_k , como indicado na Figura 2.b.

Em Felix et al. (2021) são descritos diferentes tipos de RNA, as quais se diferenciam basicamente quanto à topologia (arquitetura da rede) e, o processo de aprendizado. Braga et al. (2000) relatam que a estrutura ou topologia da rede tem grande importância sobre o seu comportamento e capacidade de processamento.

Neste trabalho são utilizadas redes neurais com múltiplas camadas de processamento, conhecidas como redes do tipo Multi-Layer Perceptron (MLP), que possuem como característica a capacidade de mapear problemas de alta complexidade, onde os dados se relacionam de modo não linear (RUMMELHART; MCCLELLAND, 1986). Destaca-se que o presente trabalho tem como base os resultados apresentados em Felix et al. (2021), onde os autores apresentam o procedimento, passo a passo, de treinamento de redes MLP.

4 | MODELAGEM VIA RNA

Com o objetivo de determinar um modelo de dimensionamento à flexão de vigas de concreto armado, adotou-se neste trabalho a metodologia apresentada em na Figura 3.

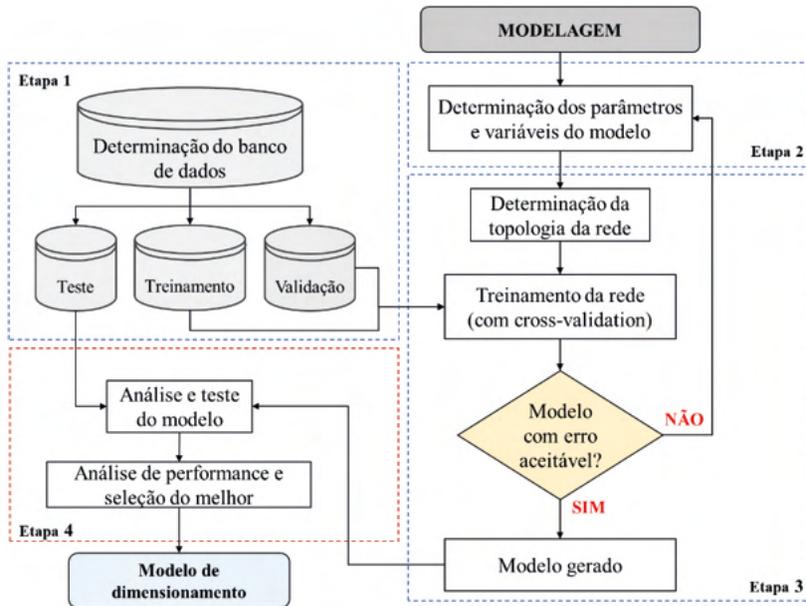


Figura 3 - Metodologia empregada para a determinação dos modelos.

De forma simplificada, a metodologia foi definida por quatro etapas, conforme esquematizado na Figura 3, sendo a primeira etapa, caracterizada pela montagem de um banco de dados, considerando resultados obtidos no dimensionamento de vigas de concreto armado de seção retangular, com diferentes geometrias, níveis de carregamento, resistência à compressão do concreto e cobrimento (associado aos diferentes ambientes de agressividade). Os dimensionamentos foram conduzidos de acordo com as Equações (1-6) e norma NBR 6118 (ABNT,2014). Na segunda etapa, foram especificados os parâmetros empregados na modelagem e, o domínio de aplicabilidade do modelo. Na terceira etapa foram realizados o treinamento e a validação das redes, considerando diferentes topologias. Ainda na terceira etapa, realizou-se algumas análises a fim de selecionar as redes com os melhores desempenhos. Por fim, na quarta etapa, analisou-se a performance dos modelos gerados, determinando o que apresentava os menores erros e melhores coeficientes de determinação.

4.1 Definição do banco de dados e seleção do domínio de aplicabilidade

A definição de um banco de dados consistente, contendo dados confiáveis e representativos, refere-se à primeira e principal etapa para o desenvolvimento de um modelo baseado em redes neurais artificiais. Sabendo disso, o banco de dados foi definido considerando resultados diversos dimensionamentos realizados por meio de uma planilha, na qual emprega as Equações (1-6) e os preceitos da NBR 6118 (ABNT,2014).

No total, foram criados 15.000 casos, considerando diferentes resistências à

compressão (de 20 a 50 MPa), geometrias (com altura variando entre 0,3 e 0,5 m, e largura variando entre 0,2 e 0,3 m), diâmetros de armaduras (entre 10 e 16 mm), vão livre da viga (variando entre 2 e 4 m), cobrimentos (20, 25 e 30 mm) e, diferentes níveis de carregamento distribuído (de 20 a 40 kN/m).

Para o processo de modelagem, foi necessário dividir o banco de dados, sendo o mesmo composto por três subconjuntos, dos quais: um foi utilizado para o treinamento (70% dos dados), um para a validação (15% dos dados) e outro para a fase de teste e performance do modelo (15% dos dados).

De acordo com Felix et al. (2019) em todo processo de modelagem, a escolha das variáveis do modelo é de suma importância, pois a seleção inapropriada pode dificultar ou fazer com que as RNA não consigam processar informações, inviabilizando o mapeamento entre os dados de entrada e saída.

Sabendo disso, e considerando os preceitos da NBR 6118 (ABNT, 2014), para o treinamento das redes foram utilizadas as seguintes variáveis predictoras: diâmetro da armadura (m), altura da seção (m), largura da seção (m), dimensão do vão livre (m), resistência característica do concreto (MPa), altura útil (m) e, o momento solicitante de projeto (kN.m).

4.2 Treinamento das redes

Para modelagem, as redes foram geradas diferenciando-as pela quantidade de neurônios presentes na camada ocultas (camada responsável pelo treinamento das redes), conforme esquema apresentado na Figura 4. O número de neurônios de cada camada oculta foi variado entre 1 e 9, levando a concepção de 9 diferentes topologias.

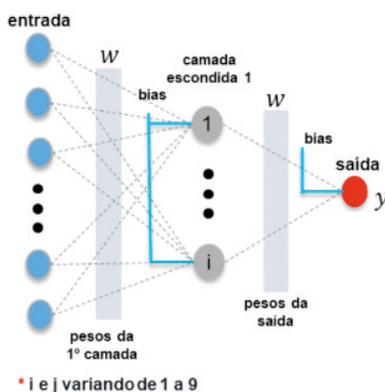


Figura 4 - Topologia das RNA geradas.

Todas as redes foram criadas utilizando um pacote computacional denominado project-yapy, desenvolvido por Konzen e Felix (2011).

O treinamento das RNA foi conduzido considerando redes *feedforward* com o algoritmo de aprendizagem *backpropagation*, e método de busca do erro mínimo local *Levenberg-Marquardt*. Todas as saídas processadas em cada neurônio foram ativadas por funções de ativação do tipo tangente-sigmoide. Para melhor esclarecimento da técnica de treinamento e modelagem com RNA, indica-se a consulta ao trabalho de Felix et al. (2021).

O treinamento e a validação foram realizados em paralelo, para evitar o supertreinamento, que é quando a rede mapeia perfeitamente os dados do conjunto de treinamento, mas não consegue interpolar seus resultados para os dados de validação, apresentando baixo índice de performance (HAYKIN, 2001). Como critério de convergência, foi utilizado o valor da raiz do erro médio quadrático (*RMSE*), conforme Equação 7, ou paralização do treinamento quando o número de iterações alcança o valor 10^4 , ou ainda, quando o *RMSE* não apresentava valores menores ao superar 10^3 iterações.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - t_i)^2} \quad \text{(Equação 7)}$$

em que y_i refere-se aos valores estimados pela rede, t_i representa os valores conhecidos (targets) e n o número de dados empregados na análise.

4.3 Análise de performance do modelo

Por fim, após realizado o treinamento de todas as RNA, uma análise de performance dos modelos foi conduzida com o intuito de determinar o que gerava o melhor desempenho. Para a análise foi avaliado o *RMSE*, o erro máximo (E_{max}) e os coeficientes de determinação (R^2) da fase de treinamento, validação e teste.

5 | RESULTADOS

Com o propósito de avaliar as arquiteturas que geraram os melhores desempenhos, na Figura 5 são apresentados os parâmetros de performance (*RMSE* e o coeficiente de determinação (R^2)) do treinamento e validação de todas as redes definidas e avaliadas neste trabalho.

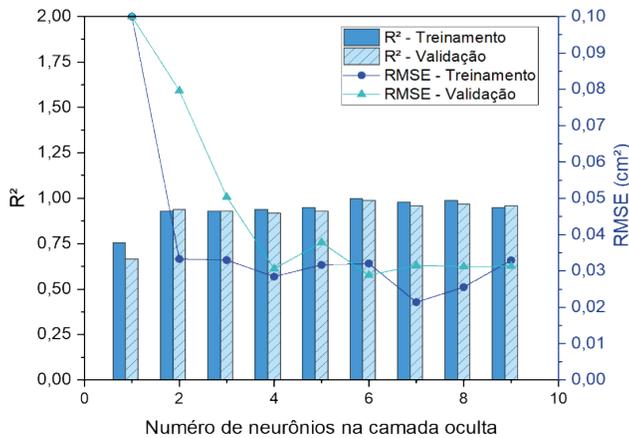


Figura 5 – RMSE e R^2 de RNA com uma camada oculta.

Inicialmente, pela Figura 5 é possível inferir que as redes apresentaram boa capacidade de mapear o problema estudado, e que, apenas a rede com um neurônio na camada oculta, não apresentou resultado satisfatório, sendo obtido um coeficiente de determinação de 0,75 no treinamento e 0,66 na validação.

Ao analisar o RMSE, a rede com seis neurônios na camada oculta (rede 7-6-1), foi a que gerou os menores erros nas etapas de treinamento e validação, sendo os respectivos valores de 0,032 e 0,028 cm^2 , respectivamente. Os coeficientes de determinação obtidos no treinamento dessa rede foram de 0,99 no treinamento e 0,98 na validação. Estes indicadores demonstram que a rede conseguiu, de modo satisfatório, compreender o problema, indicando um ótimo mapeamento.

Por fim, para avaliar a aplicabilidade do modelo gerado com a rede 7-6-1, na Figura 6 são apresentados os gráficos de correlação entre os valores determinados pela rede e os observados no banco de dados de teste. A Figura 6 apresenta ainda, o gráfico com a comparação dos valores preditos para todos os conjuntos de dados utilizados no treinamento e validação. Observa-se que independente do conjunto de dados avaliado, o coeficiente de determinação é superior a 0,95, indicando um alto índice de generalização do modelo proposto, assim como, de sua aplicabilidade.

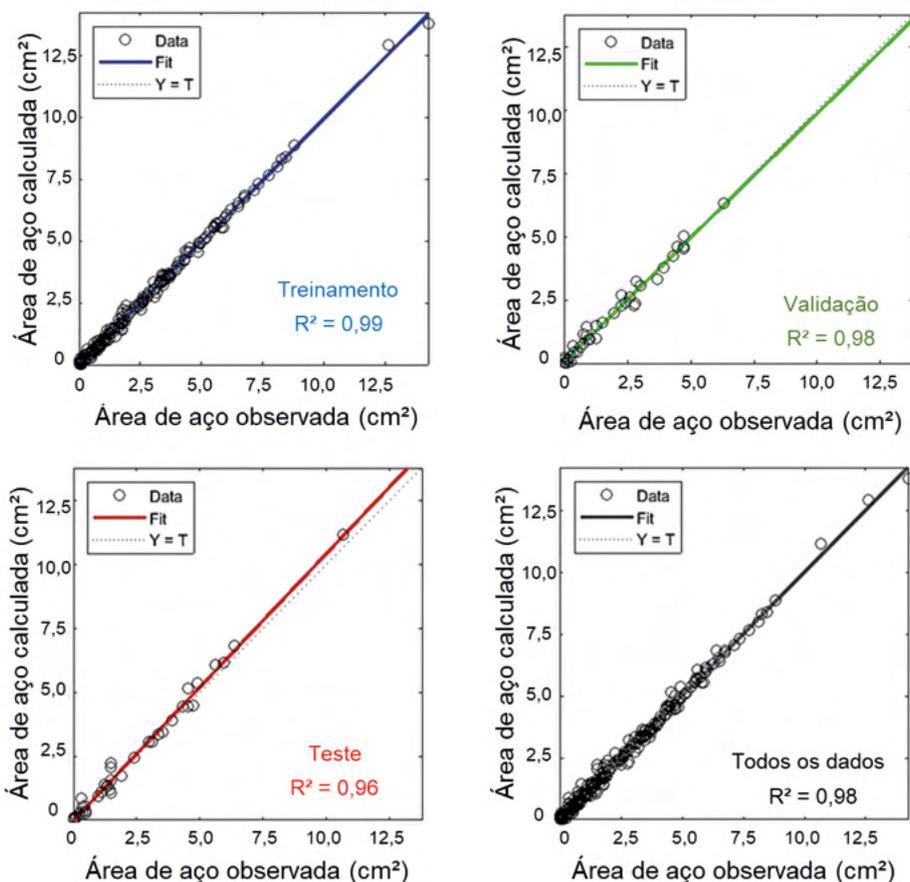


Figura 6 – Coeficientes de determinação do modelo para todos os conjuntos de dados.

Diante dos resultados apresentados na Figura 6 pôde-se verificar que o modelo apresenta desempenho satisfatório frente à predição da profundidade de carbonatação, apresentando resultados coerentes com os obtidos nas fases de treinamento e validação (Figura 5). Quanto os erros obtidos pela aplicação do modelo, observou-se que cerca de 95% dos valores previstos apresentaram erros inferiores ao RMSE de (0,21 cm²) da fase de teste.

Ao avaliar os resultados obtidos, o modelo obtido pela aplicação do treinamento de redes neurais artificiais, demonstra a aplicabilidade desta técnica, para o desenvolvimento de aplicações de dimensionamento de estruturas de concreto armado.

6 I CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentada a aplicação de redes neurais artificiais do tipo MLP, no desenvolvimento de um modelo de dimensionamento à flexão de vigas de concreto

armado de seção retangular.

As redes geraram modelos eficientes para o calcula da taxa de armadura em vigas de concreto armado, considerando como variáveis predictoras o diâmetro da armadura longitudinal, a altura útil, geometria da seção transversal (largura e altura), a resistência à compressão do concreto, a intensidade do carregamento distribuído e o comprimento de vão livre da viga.

Em relação ao modelo proposto, algumas considerações foram levantadas:

- Devido ao alto número de dados definidos no problema, as redes foram capazes de mapear a taxa de armadura, com baixo erros e altos coeficientes de determinação;
- Para o problema estudado, foi observado que é suficiente apenas uma camada de processamento para a definição da topologia das redes;
- O dimensionamento à flexão simples de vigas de concreto armado pode ser representado por redes neurais artificiais utilizando como variáveis predictoras o diâmetro da armadura longitudinal, a altura útil, geometria da seção transversal (largura e altura), a resistência à compressão do concreto, a intensidade do carregamento distribuído e o comprimento de vão livre da viga. E indicam que outras variáveis envolvidas no problema não se fazem necessárias.

Os resultados encontrados na etapa de testes demonstraram a potencialidade das redes em determinar a área de aço necessária para a vigas sujeita à flexão simples, e que o emprego de RNA apresenta uma viável e eficiente ferramenta para dimensionamento de estruturas de concreto. Ademais, os resultados encontrados indicam que as redes podem ser empregadas para a determinação de softwares de dimensionamento automatizado, onde os modelos incorporam em sua formulação os preceitos da norma, e caso existentes, resultados reais e/ou experimentais.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao financiamento provido pelo Programa Pesquisa Produtividade do Centro Universitário Estácio de Ribeirão Preto.

REFERÊNCIAS

ABAMBRES, M.; LANTOSOGHT, E. O. L. ANN-Based Fatigue Strength of Concrete Under Compression. **Materials**, v. 12, n. 22, p. 1-21, 2019.

ABBAS, Y. M.; KHAN, M. I. Influence of Fiber Properties on Shear Failure of Steel Fiber Reinforced Beams Without Web Reinforcement: ANN Modeling. **Latin American Journal of Solids and Structures**, v. 13, n. 8, p. 1483-1498, 2016.

ADELI, H. **Advances in Design Optimization**, E. & F. N. Spon, London, 1994.

ADELI, H. Neural networks in civil engineering: 1989-2000. **Computer-Aided Civil and Infrastructure**, v. 16, n. 2, p. 126-142, 2001.

ADELI, H.; YEH, C. Perceptron learning in engineering design. **Microcomputers in Civil Engineering**, v. 4, n. 4, p. 247-256, 1989.

AL-SUHAILI, R. H. S.; ALI, A. A. M.; BEHAYA, S. A. K. Artificial Neural Network Modeling for Dynamic Analysis of a Dam Reservoir-Foundation System. **International Journal of Engineering Research and Applications**, v. 4, n. 1, p. 121-143, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6120: Cargas para o cálculo de edificações**. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

BABIKER, A. A.; ADAM, F. M.; MOHAMED, A. E. Design optimization of reinforced concrete beams using artificial neural network. **International Journal of Engineering Inventions**, v. 1, n. 8, p. 7-13, 2012.

BONINI NETO, A.; BONINI, C. S. B.; BISI, B. S.; COLETTA, L. F. S.; DOS REIS, A. R.; Artificial Neural Network for Classification and Analysis of Degraded Soils. **IEEE Latin America Transactions**, vol. 15, pp. 503-509, 2017.

BRAGA, A. P.; LUDEMIR, T. B.; CARVALHO, A. C. **Redes Neurais Artificiais: Teoria e Aplicações**. Rio de Janeiro, LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora, 2000.

CHEN, H. M.; QI, G. Z.; YANG, J. C. S.; AMINI, F. Neural network for structural dynamic model identification. **Journal of Engineering Mechanics**, v. 121, n. 12, p. 1377–1381, 1995.

FELIX, E. F.; POSSAN, E.; CARRAZEDO, R. Analysis of training parameters in the ANN learning process to mapping the concrete carbonation depth. **Journal of Building Pathology and Rehabilitation**, v. 4, n. 1, p. 16, 2019.

FELIX, E. F.; POSSAN, E.; CARRAZEDO, R. **Artificial Intelligence Applied in the Concrete Durability Study**. In: *Hygrothermal Behaviour and Building Pathologies*. Springer, Cham. p. 99-121, 2021.

FORDE, M. C. **High performance construction materials and systems: an essential program for America and its infrastructure technical report 93–5011**. American Society of Civil Engineers, New York. ISBN 0-87262-938-2, 1993.

GU, X. L.; ZHANG, W. P.; SHANG, D. F. Flexural Behavior of corroded Reinforced Concrete Beams, In: Song, G. B.; Malla, R. B. *Earth and Space, 2010: Engineering, Science, Construction and Operations in Challenging Environments*, p. 3545–3552, 2010.

HAJELA, P.; BERKE, L. Neurobiological computational models in structural analysis and design, **Computers and Structures**, v. 41 n. 4, p. 657–67, 1991.

HAYKIN, S. **Neural networks: a comprehensive foundation**, 2th ed. Tsinghua University Press, 2001.

JENKINS, W. M. A neural network for structural re-analysis. **Computers and Structures**, v. 72, p. 687–98, 1999.

KANG, H. T.; YOON, C. J. Neural network approaches to aid simple truss design problems, **Microcomputers in Civil Engineering**, v. 9, n. 3, 211–18, 1994.

KONZEN, P. H. A.; FELIX, E. F. **project-yapy - Pacote computacional com RNAs orientado-a-objetos C++**. 2011. Disponível em: <<https://code.google.com/archive/p/project-yapy>>.

KUSHIDA, M.; MIYAMOTO, A.; KINOSHITA, K. Development of concrete bridge rating prototype expert system with machine learning, **Journal of Computing in Civil Engineering (ASCE)**, v. 11, n. 4, p. 238–47, 1997.

LAZAREVSKA, M.; KNEZEVIC, M.; CVETKOVSKA, M. Application of Artificial Neural Network in Civil Engineering. **Journal Tehnicki Vjesnik**, v. 21, n. 6, p. 126-142, 2014.

ROGERS, J. L. Simulating structural analysis with neural network, **Journal of Computing in Civil Engineering (ASCE)**, v. 8, n. 2, p. 252–65, 1994.

RUMMELHART, D. E.; MCCLELLAND, J. L. **Parallel Distributed Processing - Explorations in the Microstructure of Cognition, vol. 1: Foundations**. A Bradford Book-The MIT Press, 1986.

SHAFABAKHSH, G.; TALEBSAFA, M.; MOTAMED, M.; BADROODI, S. Analytical evaluation of load movement on flexible pavement and selection of optimum neural network algorithm. **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 19, n. 4, p. 709-715, 2012.

STAVROULAKIS, G. E.; ANTES, H. Neural crack identification in steady state elastodynamics. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, v. 165, p. 129–146, 1998.

VAFAEI, M.; ADNAN, A. B.; RAHMAN, A. B. A. Real-time Seismic Damage Detection of Concrete Shear Walls Using Artificial Neural Networks. **Journal of Earthquake Engineering**, v. 17, n. 1, p. 137-154, 2013.

WU, X.; GHABOUSSI, J.; GARRETT, J. H. Use of neural networks in prediction of structural damage, **Computers and Structures**, v. 42, n. 4, p. 649–59, 1992.

ÍNDICE REMISSIVO

A

Altas Temperaturas 78, 79, 87, 88, 90, 91, 102, 173, 174, 175, 180

Análise Estrutural 115, 119, 122, 124, 255

Argamassa 83, 92, 150, 152, 153, 154, 156, 157, 158, 159, 244, 249, 295, 300

Arquitetura Hospitalar 103, 107, 112

Avaliação de Desempenho 103, 104, 106, 107, 112, 113

B

Bim 3, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 195, 196, 197, 198, 199, 200, 201, 202, 203, 204, 205

BIM 5D 58, 59, 61, 65

C

Cimento 67, 71, 73, 79, 80, 84, 90, 91, 92, 94, 95, 125, 126, 128, 129, 130, 131, 132, 133, 134, 135, 150, 152, 153, 154, 156, 157, 158, 162, 163, 164, 165, 207, 245, 254, 258, 304

Concreto 1, 2, 5, 12, 46, 57, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 90, 91, 92, 93, 94, 96, 97, 98, 99, 101, 112, 114, 152, 153, 158, 159, 175, 192, 207, 220, 245, 246, 251, 254, 259, 266, 267, 271, 272, 299, 300, 302, 303, 304, 305, 307, 308, 309, 312, 313, 314

Concreto Armado 1, 2, 5, 46, 67, 68, 69, 70, 71, 75, 76, 78, 80, 82, 83, 88, 245, 246, 254, 266, 267, 271, 272, 302, 303, 304, 307, 308, 312, 313

Contenções 160, 172, 253, 255, 265

Corrosão das armaduras 67, 68, 69, 72, 75, 80, 82

D

Decreto 58, 60, 61, 65, 66, 290, 299

Deep Beams 183, 193, 194

Degradação 48, 76, 80, 87, 90, 91, 92, 102, 105, 177, 289, 294, 295, 297, 300, 337

Disseminação 58, 60, 61, 66

Durabilidade 52, 56, 69, 75, 76, 78, 80, 88, 108, 113, 126, 173, 174, 175, 181, 207, 297, 298

E

Elementos de barra biarticulados 29, 44, 317

Ementa 58, 60, 62

Empreendimentos Rurais 46, 47, 49, 55, 56

Engenharia Civil 3, 1, 12, 28, 48, 58, 60, 62, 63, 88, 90, 113, 115, 116, 117, 125, 134, 135, 150, 172, 195, 220, 265, 266, 291, 292, 303, 304, 316, 338

Engenharia Diagnóstica 78, 80

F

Fundações Superficiais 1, 2, 3, 4, 12, 265

G

Gnaisse 173, 174, 175, 176, 179, 180

Grelhas Hiperestáticas 13, 14, 26

H

Hastes de Paredes Delgadas 14, 27

Hospital Architecture 103

I

Incêndio 51, 78, 79, 80, 83, 84, 85, 87, 90, 92, 97, 101, 108, 110, 111, 112, 175

Inspeção Predial 46, 47, 48, 49, 52, 55, 56, 57, 103, 109

Interação Solo-Estrutura 3, 1, 2, 3, 5, 11, 12, 254, 255, 265

Íons Sulfatos 67, 69, 72, 73, 75

L

Látex da seringueira 150, 151, 157

M

Máquinas de ar condicionado 195, 196, 198, 199, 201, 202, 203

Mecânica Vetorial 115, 116, 117, 118, 119

Metodologia Empírico-Mecanística 125, 134

Microzonificación, Peligro, Vulnerabilidad, Riesgo 136

Modelagem 6D 195

Módulo de Resiliência 125, 126, 129, 130, 131, 132, 133, 134, 135

P

Patologias 47, 48, 56, 57, 76, 115, 291, 296, 298, 300

Pavimentação 125, 129, 134, 135, 239

Performance Evaluation 103

R

Recalque 1, 3, 4, 263

S

SAP2000 1, 2, 3, 5

SFRC 183, 193

Shear Strength 183, 193

Solo-Cimento 125, 126, 128, 131, 133, 134, 135

T

Tensão de bimomento 13, 24, 26

Tensão de flexão 13, 26, 27

Tratamento Térmico 173, 174, 175, 176, 177, 178, 179, 180, 181

Treliça 28, 29, 40, 116, 119, 120, 316, 317, 322, 323, 324, 325, 326, 327, 328, 330, 331

COLEÇÃO DESAFIOS DAS ENGENHARIAS:

ENGENHARIA CIVIL 3

- 
-  www.atenaeditora.com.br
 -  contato@atenaeditora.com.br
 -  [@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora)
 -  www.facebook.com/atenaeditora.com.br

COLEÇÃO

DESAFIOS DAS ENGENHARIAS:

ENGENHARIA CIVIL 3

-  www.atenaeditora.com.br
-  contato@atenaeditora.com.br
-  [@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora)
-  www.facebook.com/atenaeditora.com.br