

COLEÇÃO
DESAFIOS
DAS
ENGENHARIAS:

ENGENHARIA CIVIL



CARLOS AUGUSTO ZILLI
(ORGANIZADOR)

Atena
Editora
Ano 2021

COLEÇÃO
DESAFIOS
DAS
ENGENHARIAS:

ENGENHARIA CIVIL



CARLOS AUGUSTO ZILLI
(ORGANIZADOR)

Atena
Editora
Ano 2021

Editora Chefe

Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Assistentes Editoriais

Natalia Oliveira

Bruno Oliveira

Flávia Roberta Barão

Bibliotecária

Janaina Ramos

Projeto Gráfico e Diagramação

Natália Sandrini de Azevedo

Camila Alves de Cremona

Luiza Alves Batista

Maria Alice Pinheiro

Imagens da Capa

iStock

Edição de Arte

Luiza Alves Batista

Revisão

Os autores

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 Humanas e Sociais Aplicadas

Prof. Dr. Alexandre Jose Schumacher – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Paraná

Prof. Dr. Américo Junior Nunes da Silva – Universidade do Estado da Bahia

Profª Drª Andréa Cristina Marques de Araújo – Universidade Fernando Pessoa

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

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

Prof. Dr. Antonio Isidro-Filho – Universidade de Brasília
Prof. Dr. Arnaldo Oliveira Souza Júnior – Universidade Federal do Piauí
Prof. Dr. Carlos Antonio de Souza Moraes – Universidade Federal Fluminense
Prof. Dr. Crisóstomo Lima do Nascimento – Universidade Federal Fluminense
Prof^a Dr^a Cristina Gaio – Universidade de Lisboa
Prof. Dr. Daniel Richard Sant’Ana – Universidade de Brasília
Prof. Dr. Deyvison de Lima Oliveira – Universidade Federal de Rondônia
Prof^a Dr^a Dilma Antunes Silva – Universidade Federal de São Paulo
Prof. Dr. Edvaldo Antunes de Farias – Universidade Estácio de Sá
Prof. Dr. Elson Ferreira Costa – Universidade do Estado do Pará
Prof. Dr. Eloi Martins Senhora – Universidade Federal de Roraima
Prof. Dr. Gustavo Henrique Cepolini Ferreira – Universidade Estadual de Montes Claros
Prof. Dr. Humberto Costa – Universidade Federal do Paraná
Prof^a Dr^a Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionele delle Figlie de Maria Ausiliatrice
Prof. Dr. Jadson Correia de Oliveira – Universidade Católica do Salvador
Prof. Dr. José Luis Montesillo-Cedillo – Universidad Autónoma del Estado de México
Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense
Prof^a Dr^a Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins
Prof. Dr. Luis Ricardo Fernandes da Costa – Universidade Estadual de Montes Claros
Prof^a Dr^a Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Marcelo Pereira da Silva – Pontifícia Universidade Católica de Campinas
Prof^a Dr^a Maria Luzia da Silva Santana – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Prof. Dr. Miguel Rodrigues Netto – Universidade do Estado de Mato Grosso
Prof. Dr. Pablo Ricardo de Lima Falcão – Universidade de Pernambuco
Prof^a Dr^a Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Prof^a Dr^a Rita de Cássia da Silva Oliveira – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Prof. Dr. Rui Maia Diamantino – Universidade Salvador
Prof. Dr. Saulo Cerqueira de Aguiar Soares – Universidade Federal do Piauí
Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará
Prof^a Dr^a Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande
Prof^a Dr^a Vanessa Ribeiro Simon Cavalcanti – Universidade Católica do Salvador
Prof. Dr. William Cleber Domingues Silva – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

Ciências Agrárias e Multidisciplinar

Prof. Dr. Alexandre Igor Azevedo Pereira – Instituto Federal Goiano
Prof. Dr. Arinaldo Pereira da Silva – Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará
Prof. Dr. Antonio Pasqualetto – Pontifícia Universidade Católica de Goiás
Prof^a Dr^a Carla Cristina Bauermann Brasil – Universidade Federal de Santa Maria
Prof. Dr. Cleberton Correia Santos – Universidade Federal da Grande Dourados
Prof^a Dr^a Diocléa Almeida Seabra Silva – Universidade Federal Rural da Amazônia
Prof. Dr. Écio Souza Diniz – Universidade Federal de Viçosa
Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul
Prof. Dr. Fágner Cavalcante Patrocínio dos Santos – Universidade Federal do Ceará
Prof^a Dr^a Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Prof. Dr. Jael Soares Batista – Universidade Federal do Semi-Árido
Prof. Dr. Jayme Augusto Peres – Universidade Estadual do Centro-Oeste
Prof. Dr. Júlio César Ribeiro – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Prof^a Dr^a Lina Raquel Santos Araújo – Universidade Estadual do Ceará
Prof. Dr. Pedro Manuel Villa – Universidade Federal de Viçosa
Prof^a Dr^a Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará
Prof^a Dr^a Talita de Santos Matos – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro

Prof. Dr. Tiago da Silva Teófilo – Universidade Federal Rural do Semi-Árido
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas

Ciências Biológicas e da Saúde

Prof. Dr. André Ribeiro da Silva – Universidade de Brasília
Profª Drª Anelise Levay Murari – Universidade Federal de Pelotas
Prof. Dr. Benedito Rodrigues da Silva Neto – Universidade Federal de Goiás
Profª Drª Daniela Reis Joaquim de Freitas – Universidade Federal do Piauí
Profª Drª Débora Luana Ribeiro Pessoa – Universidade Federal do Maranhão
Prof. Dr. Douglas Siqueira de Almeida Chaves – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Edson da Silva – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri
Profª Drª Elizabeth Cordeiro Fernandes – Faculdade Integrada Medicina
Profª Drª Eleuza Rodrigues Machado – Faculdade Anhanguera de Brasília
Profª Drª Elane Schwinden Prudêncio – Universidade Federal de Santa Catarina
Profª Drª Eysler Gonçalves Maia Brasil – Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira
Prof. Dr. Ferlando Lima Santos – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Profª Drª Fernanda Miguel de Andrade – Universidade Federal de Pernambuco
Prof. Dr. Fernando Mendes – Instituto Politécnico de Coimbra – Escola Superior de Saúde de Coimbra
Profª Drª Gabriela Vieira do Amaral – Universidade de Vassouras
Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria
Prof. Dr. Helio Franklin Rodrigues de Almeida – Universidade Federal de Rondônia
Profª Drª Iara Lúcia Tescarollo – Universidade São Francisco
Prof. Dr. Igor Luiz Vieira de Lima Santos – Universidade Federal de Campina Grande
Prof. Dr. Jefferson Thiago Souza – Universidade Estadual do Ceará
Prof. Dr. Jesus Rodrigues Lemos – Universidade Federal do Piauí
Prof. Dr. Jônatas de França Barros – Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. José Max Barbosa de Oliveira Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará
Prof. Dr. Luís Paulo Souza e Souza – Universidade Federal do Amazonas
Profª Drª Magnólia de Araújo Campos – Universidade Federal de Campina Grande
Prof. Dr. Marcus Fernando da Silva Praxedes – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Profª Drª Maria Tatiane Gonçalves Sá – Universidade do Estado do Pará
Profª Drª Mylena Andréa Oliveira Torres – Universidade Ceuma
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federaci do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Paulo Inada – Universidade Estadual de Maringá
Prof. Dr. Rafael Henrique Silva – Hospital Universitário da Universidade Federal da Grande Dourados
Profª Drª Regiane Luz Carvalho – Centro Universitário das Faculdades Associadas de Ensino
Profª Drª Renata Mendes de Freitas – Universidade Federal de Juiz de Fora
Profª Drª Vanessa da Fontoura Custódio Monteiro – Universidade do Vale do Sapucaí
Profª Drª Vanessa Lima Gonçalves – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande
Profª Drª Welma Emidio da Silva – Universidade Federal Rural de Pernambuco

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

Linguística, Letras e Artes

Profª Drª Adriana Demite Stephani – Universidade Federal do Tocantins
Profª Drª Angeli Rose do Nascimento – Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro
Profª Drª Carolina Fernandes da Silva Mandaji – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Profª Drª Denise Rocha – Universidade Federal do Ceará
Profª Drª Edna Alencar da Silva Rivera – Instituto Federal de São Paulo
Profª Drª Fernanda Tonelli – Instituto Federal de São Paulo,
Prof. Dr. Fabiano Tadeu Grazioli – Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões
Prof. Dr. Gilmei Fleck – Universidade Estadual do Oeste do Paraná
Profª Drª Keyla Christina Almeida Portela – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Paraná
Profª Drª Miranilde Oliveira Neves – Instituto de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará
Profª Drª Sandra Regina Gardacho Pietrobon – Universidade Estadual do Centro-Oeste
Profª Drª Sheila Marta Carregosa Rocha – Universidade do Estado da Bahia

Conselho Técnico científico

Prof. Me. Abrãao Carvalho Nogueira – Universidade Federal do Espírito Santo
Prof. Me. Adalberto Zorzo – Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza
Prof. Dr. Adaylson Wagner Sousa de Vasconcelos – Ordem dos Advogados do Brasil/Seccional Paraíba
Prof. Dr. Adilson Tadeu Basquerote Silva – Universidade para o Desenvolvimento do Alto Vale do Itajaí
Profª Ma. Adriana Regina Vettorazzi Schmitt – Instituto Federal de Santa Catarina
Prof. Dr. Alex Luis dos Santos – Universidade Federal de Minas Gerais
Prof. Me. Alexsandro Teixeira Ribeiro – Centro Universitário Internacional
Profª Ma. Aline Ferreira Antunes – Universidade Federal de Goiás
Profª Drª Amanda Vasconcelos Guimarães – Universidade Federal de Lavras
Prof. Me. André Flávio Gonçalves Silva – Universidade Federal do Maranhão
Profª Drª Andrezza Lopes – Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento Acadêmico
Profª Drª Andrezza Miguel da Silva – Faculdade da Amazônia
Profª Ma. Anelisa Mota Gregoleti – Universidade Estadual de Maringá
Profª Ma. Anne Karynne da Silva Barbosa – Universidade Federal do Maranhão
Prof. Dr. Antonio Hot Pereira de Faria – Polícia Militar de Minas Gerais
Prof. Me. Armando Dias Duarte – Universidade Federal de Pernambuco
Profª Ma. Bianca Camargo Martins – UniCesumar
Profª Ma. Carolina Shimomura Nanya – Universidade Federal de São Carlos
Prof. Me. Carlos Antônio dos Santos – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Prof. Me. Carlos Augusto Zilli – Instituto Federal de Santa Catarina
Prof. Me. Christopher Smith Bignardi Neves – Universidade Federal do Paraná
Profª Drª Cláudia de Araújo Marques – Faculdade de Música do Espírito Santo
Profª Drª Cláudia Taís Siqueira Cagliari – Centro Universitário Dinâmica das Cataratas
Prof. Me. Clécio Danilo Dias da Silva – Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Prof. Me. Daniel da Silva Miranda – Universidade Federal do Pará

Profª Ma. Daniela da Silva Rodrigues – Universidade de Brasília
Profª Ma. Daniela Remião de Macedo – Universidade de Lisboa
Profª Ma. Dayane de Melo Barros – Universidade Federal de Pernambuco
Prof. Me. Douglas Santos Mezacas – Universidade Estadual de Goiás
Prof. Me. Edevaldo de Castro Monteiro – Embrapa Agrobiologia
Prof. Me. Edson Ribeiro de Brito de Almeida Junior – Universidade Estadual de Maringá
Prof. Me. Eduardo Gomes de Oliveira – Faculdades Unificadas Doctum de Cataguases
Prof. Me. Eduardo Henrique Ferreira – Faculdade Pitágoras de Londrina
Prof. Dr. Edwaldo Costa – Marinha do Brasil
Prof. Me. Eliel Constantino da Silva – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita
Prof. Me. Ernane Rosa Martins – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
Prof. Me. Euvaldo de Sousa Costa Junior – Prefeitura Municipal de São João do Piauí
Prof. Dr. Everaldo dos Santos Mendes – Instituto Edith Theresa Hedwing Stein
Prof. Me. Ezequiel Martins Ferreira – Universidade Federal de Goiás
Profª Ma. Fabiana Coelho Couto Rocha Corrêa – Centro Universitário Estácio Juiz de Fora
Prof. Me. Fabiano Eloy Atílio Batista – Universidade Federal de Viçosa
Prof. Me. Felipe da Costa Negrão – Universidade Federal do Amazonas
Prof. Me. Francisco Odécio Sales – Instituto Federal do Ceará
Prof. Me. Francisco Sérgio Lopes Vasconcelos Filho – Universidade Federal do Cariri
Profª Drª Germana Ponce de Leon Ramirez – Centro Universitário Adventista de São Paulo
Prof. Me. Gevair Campos – Instituto Mineiro de Agropecuária
Prof. Me. Givanildo de Oliveira Santos – Secretaria da Educação de Goiás
Prof. Dr. Guilherme Renato Gomes – Universidade Norte do Paraná
Prof. Me. Gustavo Krahl – Universidade do Oeste de Santa Catarina
Prof. Me. Helton Rangel Coutinho Junior – Tribunal de Justiça do Estado do Rio de Janeiro
Profª Ma. Isabelle Cerqueira Sousa – Universidade de Fortaleza
Profª Ma. Jaqueline Oliveira Rezende – Universidade Federal de Uberlândia
Prof. Me. Javier Antonio Albornoz – University of Miami and Miami Dade College
Prof. Me. Jhonatan da Silva Lima – Universidade Federal do Pará
Prof. Dr. José Carlos da Silva Mendes – Instituto de Psicologia Cognitiva, Desenvolvimento Humano e Social
Prof. Me. Jose Elyton Batista dos Santos – Universidade Federal de Sergipe
Prof. Me. José Luiz Leonardo de Araujo Pimenta – Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria Uruguay
Prof. Me. José Messias Ribeiro Júnior – Instituto Federal de Educação Tecnológica de Pernambuco
Profª Drª Juliana Santana de Curcio – Universidade Federal de Goiás
Profª Ma. Juliana Thaisa Rodrigues Pacheco – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Kamilly Souza do Vale – Núcleo de Pesquisas Fenomenológicas/UFGA
Prof. Dr. Kárpio Márcio de Siqueira – Universidade do Estado da Bahia
Profª Drª Karina de Araújo Dias – Prefeitura Municipal de Florianópolis
Prof. Dr. Lázaro Castro Silva Nascimento – Laboratório de Fenomenologia & Subjetividade/UFPR
Prof. Me. Leonardo Tullio – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Ma. Lilian Coelho de Freitas – Instituto Federal do Pará
Profª Ma. Lilian de Souza – Faculdade de Tecnologia de Itu
Profª Ma. Liliani Aparecida Sereno Fontes de Medeiros – Consórcio CEDERJ
Profª Drª Livia do Carmo Silva – Universidade Federal de Goiás
Prof. Dr. Lucio Marques Vieira Souza – Secretaria de Estado da Educação, do Esporte e da Cultura de Sergipe
Prof. Dr. Luan Vinicius Bernardelli – Universidade Estadual do Paraná
Profª Ma. Luana Ferreira dos Santos – Universidade Estadual de Santa Cruz
Profª Ma. Luana Vieira Toledo – Universidade Federal de Viçosa
Prof. Me. Luis Henrique Almeida Castro – Universidade Federal da Grande Dourados
Prof. Me. Luiz Renato da Silva Rocha – Faculdade de Música do Espírito Santo
Profª Ma. Luma Sarai de Oliveira – Universidade Estadual de Campinas
Prof. Dr. Michel da Costa – Universidade Metropolitana de Santos

Prof. Me. Marcelo da Fonseca Ferreira da Silva – Governo do Estado do Espírito Santo
Prof. Dr. Marcelo Máximo Purificação – Fundação Integrada Municipal de Ensino Superior
Prof. Me. Marcos Aurelio Alves e Silva – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo
Prof. Me. Marcos Roberto Gregolin – Agência de Desenvolvimento Regional do Extremo Oeste do Paraná
Profª Ma. Maria Elanny Damasceno Silva – Universidade Federal do Ceará
Profª Ma. Marileila Marques Toledo – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri
Prof. Dr. Pedro Henrique Abreu Moura – Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais
Prof. Me. Pedro Panhoca da Silva – Universidade Presbiteriana Mackenzie
Profª Drª Poliana Arruda Fajardo – Universidade Federal de São Carlos
Prof. Me. Rafael Cunha Ferro – Universidade Anhembi Morumbi
Prof. Me. Ricardo Sérgio da Silva – Universidade Federal de Pernambuco
Prof. Me. Renan Monteiro do Nascimento – Universidade de Brasília
Prof. Me. Renato Faria da Gama – Instituto Gama – Medicina Personalizada e Integrativa
Profª Ma. Renata Luciane Polsaque Young Blood – UniSecal
Prof. Me. Robson Lucas Soares da Silva – Universidade Federal da Paraíba
Prof. Me. Sebastião André Barbosa Junior – Universidade Federal Rural de Pernambuco
Profª Ma. Silene Ribeiro Miranda Barbosa – Consultoria Brasileira de Ensino, Pesquisa e Extensão
Profª Ma. Solange Aparecida de Souza Monteiro – Instituto Federal de São Paulo
Prof. Dr. Sullivan Pereira Dantas – Prefeitura Municipal de Fortaleza
Profª Ma. Taiane Aparecida Ribeiro Nepomoceno – Universidade Estadual do Oeste do Paraná
Prof. Me. Tallys Newton Fernandes de Matos – Universidade Estadual do Ceará
Profª Ma. Thatianny Jasmine Castro Martins de Carvalho – Universidade Federal do Piauí
Prof. Me. Tiago Silvio Dedoné – Colégio ECEL Positivo
Prof. Dr. Welleson Feitosa Gazel – Universidade Paulista

Coleção desafios das engenharias: engenharia civil

Bibliotecária: Janaina Ramos
Diagramação: Camila Alves de Cremona
Correção: Flávia Roberta Barão
Edição de Arte: Luiza Alves Batista
Revisão: Os autores
Organizador: Carlos Augusto Zilli

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

C691 Coleção desafios das engenharias: engenharia civil /
Organizador Carlos Augusto Zilli. – Ponta Grossa - PR:
Atena, 2021.

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

Inclui bibliografia

ISBN 978-65-5983-302-3

DOI: <https://doi.org/10.22533/at.ed.023211407>

1. Engenharia civil. I. Zilli, Carlos Augusto (Organizador).
II. Título.

CDD 624

Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166

Atena Editora
Ponta Grossa – Paraná – Brasil
Telefone: +55 (42) 3323-5493
www.arenaeditora.com.br
contato@arenaeditora.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

Esta obra, intitulada “Coleção Desafios das Engenharias: Engenharia Civil”, em seu primeiro volume, apresenta 18 capítulos que abordam pesquisas relevantes sobre os desafios enfrentados pela engenharia civil mundo afora, tais como: Otimização e Dimensionamento de Peças Estruturais, Concreto em Situações de Incêndio, Confiabilidade Estrutural, Prevenção de Danos em Estruturas, Estudos de Materiais Alternativos para Construção Civil, Concreto Ecológico e Descarte de Resíduos.

Desta forma, esta obra se mostra potencialmente disponível para contribuir com discussões e análises aprofundadas acerca de assuntos atuais e relevantes, servindo como base referencial para futuras investigações relacionadas à estruturas de concreto armado e materiais de construção civil.

Deixo, aos autores dos capítulos, um agradecimento especial, e aos futuros leitores, anseio que esta obra sirva como fonte inspiradora e reflexiva.

Esta obra é indicada para os mais diversos leitores, tendo em vista que foi produzida por meio de linguagem fluída e abordagem prática, o que favorece a compreensão dos conceitos apresentados pelos mais diversos públicos, sendo indicada, em especial, aos amantes da área de engenharia.

Carlos Augusto Zilli

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1..... 1

DIMENSIONAMENTO OTIMIZADO DE LAJES NERVURADAS, UTILIZANDO ALGORITMO GENÉTICO

Jessyca Priscylla de Almeida Nunes

Giuliana Furtado Franca Bono

Gustavo Bono


 <https://doi.org/10.22533/at.ed.0232114071>

CAPÍTULO 2..... 16

DIMENSIONAMENTO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO CONFORME MÉTODO TABULAR E PRINCÍPIO DE CÁLCULO DAS ZONAS

Diogo Raniere Ramos e Silva

Maria de Lourdes Teixeira Moreira

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.0232114072>

CAPÍTULO 3..... 28

CONSIDERAÇÕES SOBRE PUNÇÃO EM LAJES PLANAS DE CONCRETO ARMADO

Ailton Queiroz Junior

Aurélio de Almeida Abdoral Neto

Eduardo Emilio Martins Pinheiro Câmara

Elsimar Souza Santos

Felipe Vieira Ladislau

Janiele Moreira Roland


Kevin de Matos Costa

Luiz Alfredo Franco Pinheiro

Paola de Kácia de Souza Pinto Silva

Pedro Ignácio Lima Gadêlha Jardim

Raíssa Coelho Almeida

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.0232114073>


CAPÍTULO 4..... 43

CONFIABILIDADE ESTRUTURAL DE PÓRTICOS PLANOS DE AÇO

Danilo Luiz Santana Mapa

Marcílio Sousa da Rocha Freitas

Ricardo Azoubel da Mota Silveira

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.0232114074>


CAPÍTULO 5..... 64

PROJETO ÓTIMO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO COM SEÇÃO T UTILIZANDO OTIMIZAÇÃO POR ENXAME DE PARTÍCULAS

Rubens Silva Correia

Giuliana Furtado Franca Bono

Gustavo Bono


 <https://doi.org/10.22533/at.ed.0232114075>

CAPÍTULO 6..... 79

A SIMULAÇÃO NUMÉRICA NA RESOLUÇÃO DE DESAFIOS DA ENGENHARIA ESTRUTURAL

Tainá Mascarenhas Borghi


Ana Lucia Homce de Cresce El Debs

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.0232114076>

CAPÍTULO 7..... 93

EXPERIÊNCIAS PARA A PREVENÇÃO DE DANOS NAS ESTRUTURAS DE CONCRETO PÓS-TENSIONADO

Sergio Gavilán

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.0232114077>

CAPÍTULO 8..... 108

EMPREGO DE ENSAIOS DE DURABILIDADE EM CONCRETOS COM SINTOMAS DE EXPANSÃO EM FUNDAÇÕES DE SUBESTAÇÕES E LINHAS DE TRANSMISSÃO EM MINAS GERAIS


Marina Munaretto Copetti

Cristiane Carine dos Santos

Ana Paula Maran

Silvane Santos da Silva

Régis Luís Wagner Mallmann

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.0232114078>

CAPÍTULO 9..... 125

ANÁLISE DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS, FÍSICAS E DE DURABILIDADE DO CONCRETO POLÍMERO DESENVOLVIDO A PARTIR DA UTILIZAÇÃO DE RESINA POLIURETANA VEGETAL


Alexandre Rodriguez Murari

Giovanna Jacomelli

Victor José dos Santos Baldan

Eduvaldo Paulo Sichieri

Javier Mazariegos Pablos

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.0232114079>

CAPÍTULO 10..... 138


AVALIAÇÃO DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND POR CINZAS DE OLARIAS NO COMPORTAMENTO MECÂNICO DO CONCRETO ESTRUTURAL

Larissa Barbosa de Lima

Jozilene de Souza

Júlio César Damasceno

José Edivandro de Sousa Júnior


 <https://doi.org/10.22533/at.ed.02321140710>

CAPÍTULO 11..... 151

ESTUDO DO USO DE MATERIAIS ALTERNATIVOS NA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO

CIVIL BRASILEIRA


Marcos David dos Santos
Marco Antônio Assis de Oliveira
Danylo de Andrade Lima
Marcelo Laédson Morato Ferreira
Hosana dos Santos Lima
Jaciera Isabelle Medeiros de Oliveira

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.02321140711>

CAPÍTULO 12..... 162

ARTEFATOS DE CONCRETO LEVE E PERMEÁVEL COM A UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL E POLIESTIRENO EXPANSÍVEL


Mariana Venturini
Gabriel Salvador
Carlos Henrique Costa

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.02321140712>

CAPÍTULO 13..... 169

ANÁLISE COMPARATIVA DE MITIGAÇÃO UTILIZANDO OS CIMENTOS CPII – F 32, CPII E-40, CPIV E CPV COM METACAULIM EM AGREGADOS POTENCIALMENTE REATIVOS


Marina Munaretto Copetti
Cristiane Carine dos Santos
Ana Paula Maran
Silvane Santos da Silva
Régis Luís Wagner Mallmann

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.02321140713>

CAPÍTULO 14..... 189

ANÁLISE PRELIMINAR DO COMPORTAMENTO DE PASTAS E ARGAMASSAS DE CIMENTO PORTLAND INCORPORADAS COM PÓ À BASE DE CACTO

Gabriella Cavalcante Souza
João Victor de Paiva Rodrigues
Yasmim Medeiros Rocha
Heber Sivini Ferreira




 <https://doi.org/10.22533/at.ed.02321140714>

CAPÍTULO 15..... 201

UTILIZAÇÃO DE MATERIAIS COMPÓSITOS (POLÍMEROS REFORÇADOS POR FIBRAS) NAS PESQUISAS EXPERIMENTAIS EM VIGAS DE CONCRETO ARMADO REFORÇADAS AO CISALHAMENTO

Maicon de Freitas Arcine
Nara Villanova Menon

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.02321140715>

CAPÍTULO 16	223
CONCRETO ECOLÓGICO: SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DA AREIA PELO PÓ DE VIDRO	
Rafael Dantas Ribeiro	
 https://doi.org/10.22533/at.ed.02321140716	
CAPÍTULO 17	237
RESÍDUO DESCARTADO PELA SIDERÚRGICA DE CORUMBÁ-MS COMO POTENCIAL PARA REAPROVEITAMENTO NA CONSTRUÇÃO CIVIL	
Manoela da Silva Carvalho	
Fábio Kroll de Lima	
Felipe Fernandes de Oliveira	
Robson Fleming Ribeiro	
 https://doi.org/10.22533/at.ed.02321140717	
CAPÍTULO 18	253
REDES NEURAIS ARTIFICIAIS APLICADAS NA MODELAGEM DA DIFUSÃO DE CO ₂ NO CONCRETO	
Emerson Felipe Felix	
Renan do Vale Leonel de Assis	
 https://doi.org/10.22533/at.ed.02321140718	
SOBRE O ORGANIZADOR	272
ÍNDICE REMISSIVO	273

REDES NEURAIS ARTIFICIAIS APLICADAS NA MODELAGEM DA DIFUSÃO DE CO₂ NO CONCRETO

Data de aceite: 01/07/2021

Data de submissão: 02/06/2021

Emerson Felipe Felix

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

Renan do Vale Leonel de Assis

Professor, Centro Universitário Estácio de
Ribeirão Preto
Ribeirão Preto – São Paulo
<http://lattes.cnpq.br/8832411722582519>

RESUMO: Neste trabalho é apresentado o desenvolvimento de um modelo baseado em redes neurais artificiais (RNA) para a estimativa da profundidade de difusão de CO₂ no concreto. O modelo foi desenvolvido em duas etapas, sendo a primeira referente à determinação de um banco de dados atualizado considerando concretos com distintas classes de resistência à compressão. A segunda etapa, refere-se ao emprego da técnica de modelagem com o aprendizado de máquinas, Rede Neural Artificial (RNA). Para avaliar a aplicabilidade do modelo concebido, a formulação é testada e validada considerando resultados disponíveis na literatura. Os resultados obtidos, demonstram a aplicabilidade das redes no desenvolvimento de modelos preditivos da carbonatação do concreto e, mostram que a depender do número de neurônios empregados no treinamento das redes, coeficientes de

determinação acima de 90% são obtidos, valor superior aos coeficientes determinados utilizando técnicas de regressão. Os resultados apontam que o modelo desenvolvido apresenta uma ferramenta alternativa para o estudo e análise da vida útil de estruturas de concreto armado, diante da avaliação da carbonatação do concreto.

PALAVRAS-CHAVE: Estruturas de concreto armado, difusão de CO₂, modelagem numérica, Inteligência Artificial.

APPLICATION OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS TO MODELING THE CO₂ CONCRETE DIFFUSION

ABSTRACT: This work aims to propose a model based on artificial neural networks (ANN) to estimate the depth of CO₂ diffusion in concrete. The model was developed in two stages, the first referring to the determination of an updated database considering concrete with different classes of compression strength. The second stage refers to the use of the modeling technique with machine learning, the Artificial Neural Network (ANN). To assess the applicability of the designed model, the formulation is tested and validated considering results available in the literature. The results obtained demonstrate the applicability of the networks in the development of predictive models of concrete carbonation and, show that depending on the number of neurons used in the training of the networks, determination coefficients above 90% can be obtained, a value higher than the coefficients determined by regression techniques. The results show that the developed model presents an alternative tool for the study and analysis of the useful life of

reinforced concrete structures, in view of the concrete carbonation assessment.

KEYWORDS: Reinforced concrete structures, CO₂ diffusion, numerical modeling, Artificial Intelligence.

1 | INTRODUÇÃO

1.1 Aspectos gerais

O concreto é um dos materiais mais empregado na construção civil, sendo basicamente o resultado da mistura de cimento, água, brita e areia, porém esse material está suscetível a possíveis deteriorações devido a diversos fatores que podem promover a degradação do mesmo. Das mais diversas causas para a sua deterioração, a mais comum, é o processo de carbonatação responsável pela corrosão das armaduras imersas no concreto (REUS, 2017).

Um dos fatores mais relevante para essa manifestação patológica é o ambiente ao qual o concreto está inserido que pode influenciar neste processo, sendo que quanto mais agressivo for o meio, mais rápida é a velocidade de deterioração. A carbonatação é um dos principais agentes iniciadores da corrosão que é um dos mecanismos mais frequentes para degradação de concreto armado (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Assim, a velocidade de propagação da manifestação patológica varia com o ambiente de exposição da estrutura, podendo então ter uma agressividade ambiental maior ou menor.

De acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014) agressividade ambiental é classificada como fraca, moderada, forte e muito forte, onde o risco de deterioração de estruturas de concreto é insignificante, pequeno, grande e elevado, respectivamente.

Levando em consideração a influência do ambiente no processo de carbonatação, em estrutura de concreto armado e, que a corrosão se apresenta como a manifestação patológica com o maior índice de ocorrência nestas estruturas (DAL MOLIN, 1988; ANDRADE, 1991).

A Mehta e Monteiro (2014) destacam a importância de se conhecer as variáveis de influência na degradação do concreto, especialmente o ambiente de exposição da edificação (marinho, urbano, industrial) e sua agressividade, a qual pode ser expressa pelo teor de agentes agressivos presentes na atmosfera (CO₂, íons cloreto, sulfatos, álcalis, entre outros). Dal Molin et al. (1988) destacam que estas informações darão subsídio tanto para a modelagem da durabilidade quanto para a simulação de vida útil, uma vez que o ambiente de exposição influi diretamente na velocidade e intensidade da degradação da edificação.

Atualmente a utilização de ferramentas computacionais, a exemplo das Redes Neurais Artificiais, apresentam-se como uma alternativa viável e eficaz para contornar as dificuldades impostas no processo de modelagem da carbonatação do concreto, 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 sem levar em conta todos os fatores de influência (FELIX; POSSAN, 2018).

Assim, devido à crescente utilização de RNA para modelar a profundidade de carbonatação do concreto (MARTINS, 2011; FELIX, 2015), o presente trabalho surge com o intuito de determinar e analisar um modelo da profundidade de carbonatação de estruturas de concreto situadas em ambiente urbano por meio de Redes Neurais Artificiais, do tipo Multi-Layer Perceptron, tendo como base o modelo desenvolvido em Felix 2015.

1.2 Carbonatação do concreto

A carbonatação é um complexo processo físico-químico onde os compostos do cimento, hidratados ou não, são gradualmente substituídos por carbonatos, através de reações com o dióxido de carbono (CO₂) e outros gases ácidos como o dióxido de enxofre (SO₂) e ácido sulfídrico (H₂S). Este processo ocorre lentamente segundo a reação principal, apresentada na Equação 1 (PAULETTI, 2004).



O processo de corrosão das estruturas pela ação da carbonatação destaca-se que o ingresso de CO₂ através do concreto depende de diversos fatores. Esses fatores estão relacionados diretamente aos materiais utilizados na construção das estruturas (tipo de cimento, a resistência do concreto, permeabilidade, dentre outros), ao processo construtivo (qual a técnica utilizada, tipo e duração de cura, nível de qualidade da execução, dentre outros) e as condições ambientais em que a estrutura se encontra (temperatura, umidade relativa, ventos, concentração de agentes agressivos, dentre outros) (POSSAN, 2010).

Figueiredo et al. (2011) classifica a corrosão como localizada ou generalizada, sendo que na generalizada ocorre o desgaste do material de forma uniforme, porém se processa em áreas extensas ao longo do metal. Já na localizada ocorre o processo de corrosão em uma superfície limitada que se aprofunda rapidamente, esta é um meio termo entre corrosão generalizada e a corrosão por pite. Quando a corrosão atua em regiões discretas do material, mais ativas que o resto da superfície, caracteriza-se uma corrosão por pite, que geralmente está atrelada à ação dos cloretos.

À medida que a carbonatação atinge a profundidade do aço e promove sua despassivação, tem-se o início da fase de propagação da corrosão, os danos são imperceptíveis diferente do que ocorre na fase de propagação. A propagação é determinada pela taxa de corrosão (disponibilidade de oxigênio, umidade relativa e temperatura) e a qualidade do concreto em suportar tensões internas (TUUTTI, 1982; POSSAN, 2010; KÖLIÖ et al., 2017).

Na corrosão eletroquímica, os elétrons se movimentam no aço, partindo de regiões anódicas para regiões catódicas, completando o circuito elétrico através do eletrólito, que é uma solução iônica, conforme esquematizado na Figura 1 (HELENE, 1993).

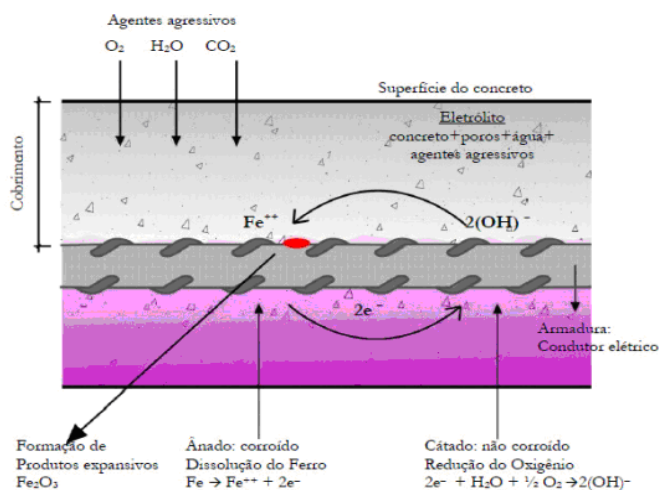


Figura 1 – Corrosão de armaduras imersas no concreto. (POSSAN, 2010).

De acordo com Cascudo et al. (2011) a carbonatação promove consequências importantes, como ganho de resistência, bem como atenuação do processo de carbonatação em si dificultando o acesso de CO_2 se explica devido à transformação do $Ca(OH)_2$ em $CaCO_3$, esse produto do próprio processo de carbonatação, colmata e preenche os poros superficiais, pois é mais volumoso. Observa-se um efeito reverso quando esse processo ocorre mais intensamente, e isso ocorre devido às concentrações elevadas de CO_2 formando poros mais grosseiros e diminuindo a resistência e facilitando a penetração de CO_2 e outros agentes agressivos.

1.3 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).

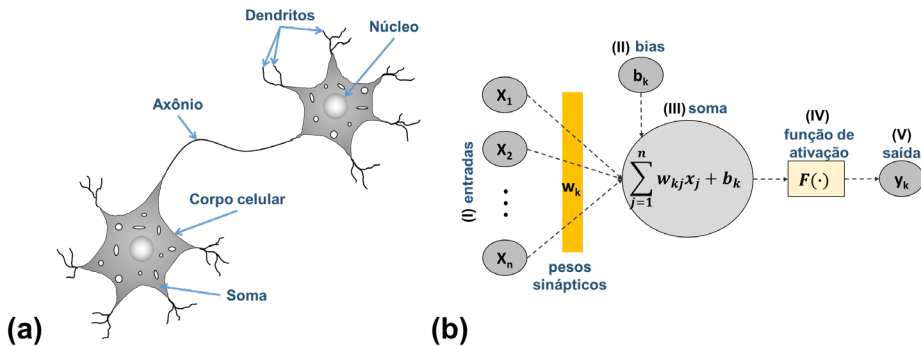


Figura 2 – Representação de (a) uma rede biológica e (b) uma rede artificial. (FELIX; POSSAN, 2018).

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 (2015), onde o mesmo processo de modelagem foi considerado, diferenciando-se no fato de que aqui é utilizado um banco de dados atualizado, que possibilitará a expansão do modelo desenvolvido anteriormente.

2 | PROCESSO DE MODELAGEM VIA RNA

Com o objetivo de determinar um modelo preditivo para a profundidade de carbonatação do concreto, adotou-se neste trabalho a metodologia apresentada em Felix et al. (2018), que é simplificada e resumida na Figura 3.

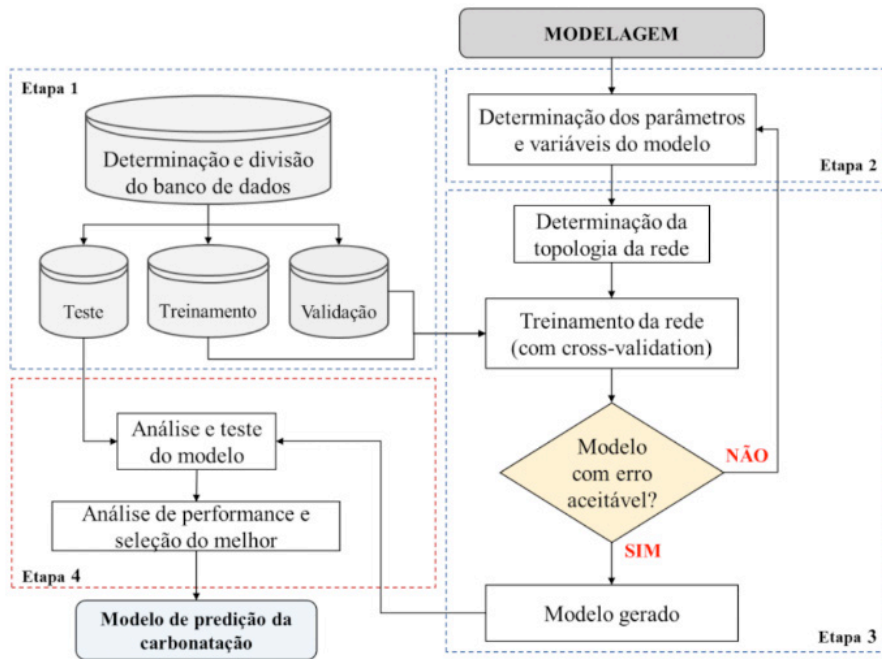


Figura 3 - Metodologia empregada para a determinação dos modelos.

De forma simplificada, a metodologia foi definida em quatro passos, de acordo com a Figura 3, sendo que a primeira etapa é caracterizada pela coleta e definição de um banco de dados, considerando resultados experimentais disponíveis na literatura, referentes a concretos produzidos com distintas classes de resistência (20 e 100 MPa). Na segunda etapa, foram realizadas análises estatísticas no banco de dados, a fim de especificar as variáveis empregadas na modelagem e o domínio de aplicação do modelo. Realizou-se na terceira etapa o treinamento e a validação das redes, considerando diferentes topologias. Em seguida foi conduzida a análise de todos os resultados e, a seleção das redes com os melhores desempenhos. Por fim, na quarta etapa, analisou-se a performance dos modelos gerados, determinando o que melhor mapeava a resistência à compressão. Acrescenta-se que ao final, foi conduzida uma análise comparativa do modelo desenvolvido e formulações analíticas disponíveis na literatura.

2.1 Definição do banco de dados

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 de diversas campanhas experimentais disponíveis na literatura (ISAIA, 1999; ATIS, 2003; SULAPHA et al., 2003; JIANG et al., 2004; MEIRA et al., 2006; KHUNTHONGKEAW et al., 2006; BURDEN, 2006; SISOMPHON; FRANKE, 2007;

LAMMERTIJN; DE BELIE, 2008; ROZIÈRE et al., 2009; VIEIRA et al., 2009; XU et al., 2010; DAS; PANDEY, 2011; ZHANG; LI, 2013; VAN; DE BELIE, 2014).

No total, foram coletados 416 dados, 138 a mais que no trabalho pioneiro desenvolvido por Felix (2015). Os dados referem-se a concretos com agregados naturais, com consumos de cimento entre 250 e 500 kg/m³, sem ou com adições de cinza volante ou escória de alto forno, e resistência à compressão entre 20 e 100 MPa. 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).

2.2 Análise estatística do banco de 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, inicialmente foi realizada uma análise de dispersão do banco de dados em relação à profundidade de carbonatação, considerando a influência dos parâmetros conhecidos e disponíveis no banco de dados, tais como, consumo de cimento (em kg/m³), teor de adições (em %), relação água/cimento, teor de CO₂ ao qual a amostra é submetida (em %), umidade relativa (*em* %) e a resistência à compressão do material (em MPa). Para cada uma das análises, determinou-se os coeficientes de correlação de Pearson “P” (Equação 2) e Spearman “S”, (Equação 3), conforme se vê na Tabela 1.

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_m)(y_i - y_m)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - x_m)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - y_m)^2}} \quad (\text{Equação 2})$$

$$\rho_s = \frac{\text{cov}(rg_x, rg_y)}{\sigma(rg_x)\sigma(rg_y)} \quad (\text{Equação 3})$$

Onde x_i e y_i referem-se as variáveis analisadas, x_m e y_m representam a média dos valores, $\text{cov}(\cdot)$ refere-se à função covariância, $\sigma(\cdot)$ é a função desvio padrão e, rg_x e rg_y são os postos de análise das variáveis x e y .

Considerando as análises de dispersão dos dados e os coeficientes de correlação apresentados na Tabela 1, foi possível estudar o comportamento dos dados disponíveis e se estes apresentavam comportamento coerente, segundo preceitos descritos na literatura.

Observou-se que existe: (i) existe uma relação inversa entre o consumo de cimento e a profundidade de carbonatação, com correlações negativas de -0,47 (Pearson) e -0,60 (Spearman); (ii) não existe uma correlação linear ou monótona entre a profundidade de carbonatação e a umidade relativa, já que os coeficientes de correlação são aproximadamente nulos; (iii) existe uma correlação direta e positiva entre a frente de carbonatação e, o teor de CO₂, e também com a relação a/c, sendo os coeficientes de correlação superiores à 0,40; e (iv) ao analisarmos o teor de adições (0,11 para Pearson e 0,07 para Spearman),

constatou-se que pelos dados coletados, não existe uma relação linear e/ou monótona com a profundidade de carbonatação, ademais, observou-se que existe um comportamento não linear entre as variáveis.

Parâmetro	Valor mínimo	Valor Máximo	Correlação P	Correlação S
Consumo de cimento (kg/m ³)	250,00	512,50	-0,47	-0,60
Relação água/cimento	0,25	0,65	0,42	0,54
Teor de adições (%)	0	72,00	0,11	0,07
Teor de CO ₂ (%)	0,01	0,5	0,52	0,55
Resistência à compressão (MPa)	20,85	99,40	-0,42	-0,45
Umidade Relativa (%)	50,00	85,00	0,05	0,08

Tabela 1 – Coeficientes de correlação de Pearson e Spearman.

Assim, diante considerando as análises conduzidas verificou-se que as influências da relação água/cimento, do teor de CO₂ e do consumo de cimento podem ser facilmente mapeadas pelas redes neurais, uma vez que possuem valores medianos para as correlações avaliadas, indicando a existência de uma lei de proporcionalidade entre as variáveis. Diferente do observado para a umidade relativa e o teor de adições. Entretanto, como a umidade relativa está intrinsecamente relacionada com o processo de difusão do CO₂ na matriz porosa do concreto (HAMADA, 1969; PARROTI, 1987; KOBAYASHI; UNO, 1990) e, o presente trabalho tem como objetivo analisar concretos com diferentes teores de adições, decidiu-se utilizar os cinco parâmetros como variáveis do modelo (consumo de cimento (kg/m³), teor de CO₂ (%), teor de adições (%), umidade relativa (%) e relação água/cimento), além da variável tempo.

2.3 Treinamento das RNA

Para modelagem da resistência à compressão, as redes foram geradas diferenciando-as pelo número de camadas ocultas (uma ou duas) e pela quantidade de neurônios presentes nas camadas ocultas (camadas responsáveis 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 90 diferentes redes.

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, pode-se consultar Felix et al. (2019) e Felix et al. (2021).

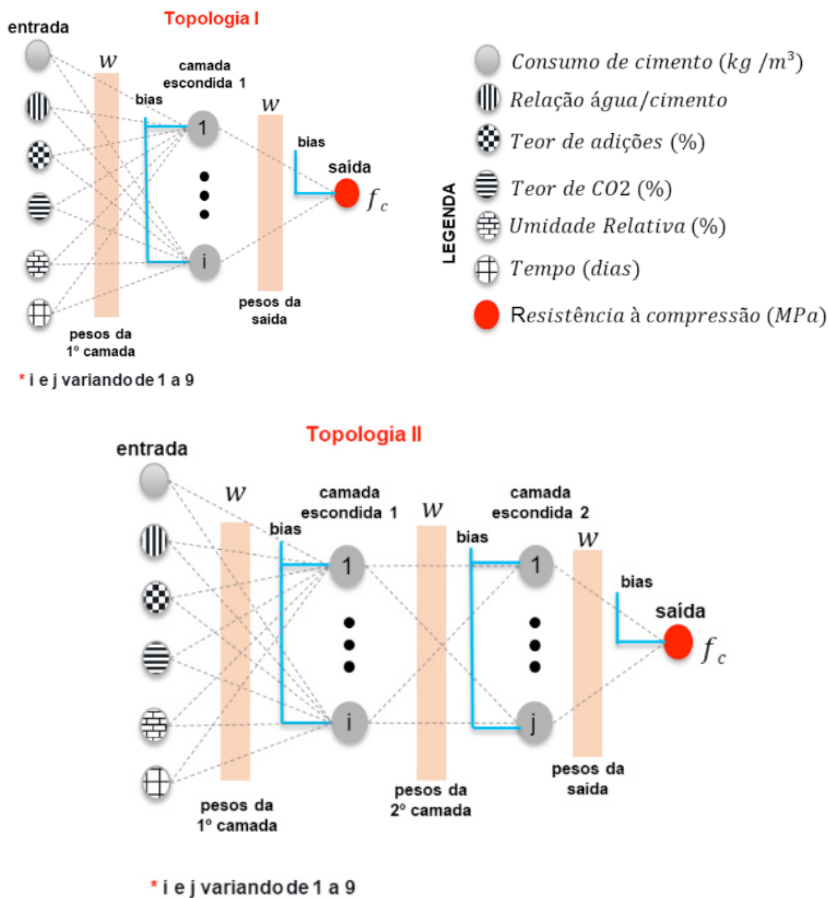


Figura 4 - Topologia das RNA geradas para a modelagem do módulo de elasticidade.

No treinamento, utilizou-se uma taxa de aprendizado de 0,4, valor indicado em FELIX et al. (2018). 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 4, ou paralização do treinamento quando o número de iterações alcança o valor 10^5 .

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - t_i)^2} \quad (\text{Equação 4})$$

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.

2.4 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 mapeamento da carbonatação do concreto. 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.

3 | RESULTADOS

Com o propósito de avaliar as arquiteturas que geraram os melhores mapeamentos da profundidade de carbonatação, nas Figuras 5-8 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.

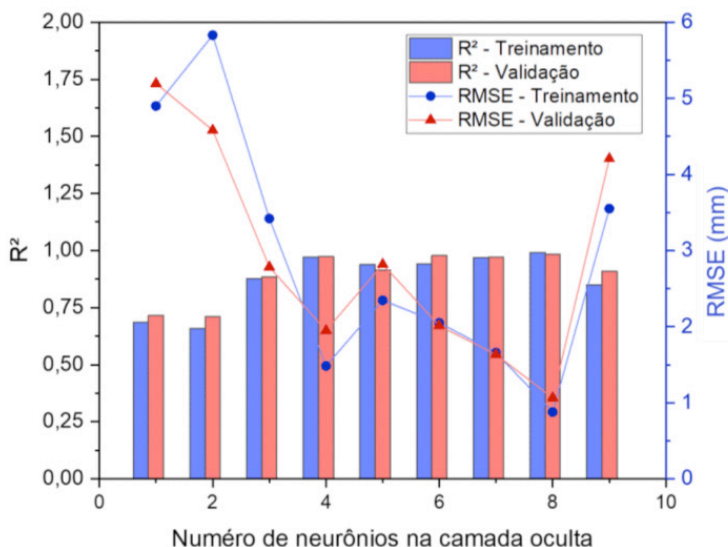


Figura 5 – $RMSE$ e R^2 de RNA com uma camada oculta.

Inicialmente, pela Figura 5, é possível verificar que ao considerar RNA produzidas com a topologia do tipo I (Figura 4), somente as redes com um e dois neurônios na camada oculta (rede 7-1-1) (em redes com apenas uma camada de processamento) obtiveram um baixo coeficiente de determinação, enquanto todas as demais geraram coeficientes superiores a 0,75, nas fases de treinamento a validação.

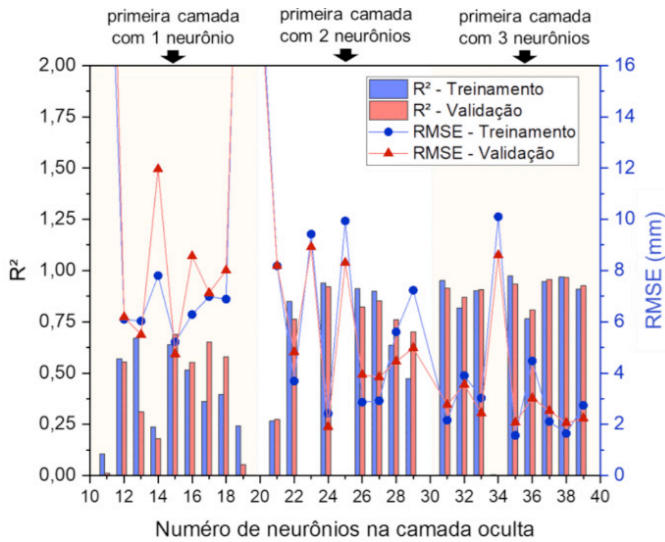


Figura 6 - RMSE e R^2 de RNA com duas camadas ocultas, com até 3 neurônios na primeira camada.

Ao analisar o RMSE, a rede com oito neurônios na camada oculta (rede 6-8-1), foi a que gerou os menores erros nas etapas de treinamento e validação, sendo os respectivos valores de 0,87 e 1,06 mm, respectivamente. Comenta-se que para facilitar a leitura da topologia das redes, nas Figuras 5-8 foi indicado no eixo das abscissas, o número de neurônios das camadas ocultas. Assim, como na Figura 5 são apresentadas as redes com apenas uma camada de processamento, os valores variam de 1 a 9.

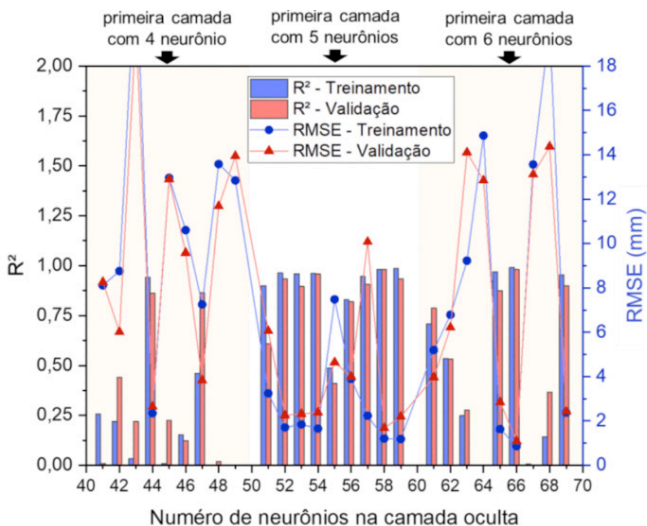


Figura 7 - RMSE e R^2 de RNA com duas camadas ocultas, e de 4 a 6 neurônios na primeira camada.

Nas Figuras 6-8, são apresentados os resultados obtidos com as RNA constituídas de duas camadas ocultas, assim um número KZ, das abscissas, representam uma rede com K neurônios na primeira e Z neurônios na segunda camada oculta, respectivamente. Para exemplificação, a abscissa de valor 34, indica uma rede com topologia 6-3-4-1, já que que para a camada de entrada, foram empregados 6 neurônios em todas as redes, e um neurônio para a camada de saída, conforme apresentado na Figura 4.

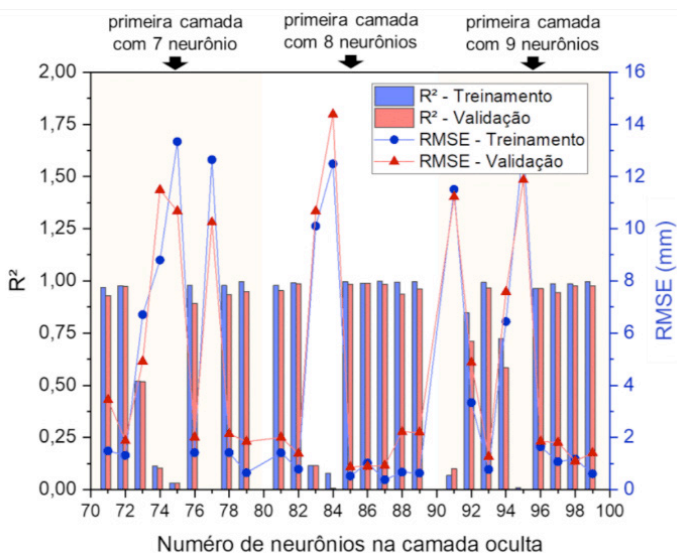


Figura 8 - RMSE e R² de RNA com duas camadas ocultas, e de 7 a 9 neurônios na primeira camada.

Ao analisar os resultados obtidos com RNA de duas camadas ocultas, observa-se pelas Figuras 6-8, que nem todas as redes proporcionam coeficientes de determinação superior aos 0,75, e mais, que as redes com um neurônio na primeira camada oculta (Figura 5) são as que geraram os piores mapeamentos, independente, do número de neurônios da segunda camada.

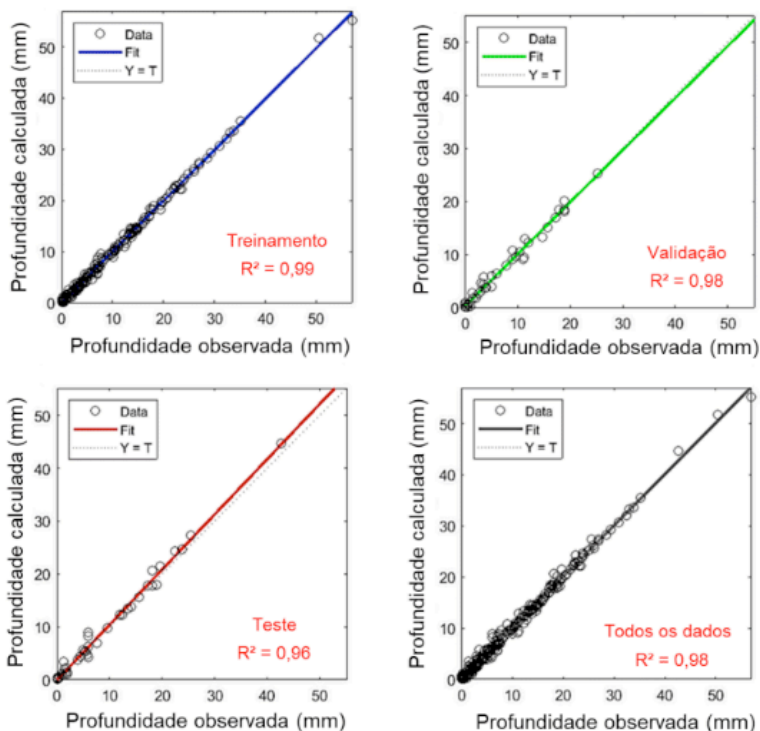


Figura 9 – Coeficientes de determinação do modelo para todos os conjuntos de dados.

Avaliando concomitantemente os coeficientes de determinação e a raiz do erro médio quadrático, inferiu-se que a rede de topologia 6-8-5-1 foi a que gerou o melhor mapeamento da profundidade de carbonatação, alcançando coeficientes de determinação de 0,99 no treinamento e 0,98 na validação. O RMSE da rede 6-8-5-1 foi de 0,51 e 0,86 mm, no treinamento e validação, respectivamente.

Por fim, para avaliar a aplicabilidade do modelo gerado com a rede 6-8-5-1, na Figura 9 são apresentados os gráficos de correlação entre os valores determinados pela rede e os observados no banco de dados de teste. A Figura 9 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 da sua aplicabilidade.

Diante dos resultados apresentados na Figura 9 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 8). Quanto os erros obtidos pela aplicação do modelo, observou-se que cerca de 80% dos valores previstos apresentaram erros inferiores ao RMSE (0,86 mm), e que se considerados os desvios na ordem de 50% do RMSE, todas as predições apresentam

resíduos dentro da região de erro, fazendo com que o erro do modelo fosse definido como $\pm 1,29$ mm.

Ao avaliar os resultados obtidos e aos observados em Felix (2015), o qual é a base deste trabalho, o modelo desenvolvido demonstra que o retreinamento de redes neurais, previamente definidas, apresenta uma boa alternativa para a atualização de modelos baseados em RNA, e que a inserção de novos dados, pode reduzir os erros e melhorar o coeficiente de determinação.

4 | CONCLUSÕES

Neste trabalho foi desenvolvido e avaliado um modelo baseado em RNA para a predição da profundidade de carbonatação de concretos de distintas classes de resistência à compressão.

As redes geraram modelos capazes de representar coerentemente a profundidade de carbonatação, em função do consumo de cimento, teor de adições, relação água/cimento, umidade relativa do ambiente, teor de CO_2 na atmosfera circundante e idade do material, demonstrando a eficiência da técnica de modelagem empregada.

Em relação a melhor modelo proposto, algumas considerações são elencadas:

- A carbonatação do concreto pode ser melhor mapeada por modelos que levam em consideração o consumo de cimento e a relação água/cimento, uma vez que estes dois parâmetros estão envolvidos nas reações físico-químicas que definem o processo de difusão de CO_2 no concreto;
- O consumo de cimento possui influência inferior à relação água/cimento, ao avaliar a velocidade de carbonatação do concreto;
- O teor de adições possui grande impacto na capacidade de carbonatação do concreto, sendo essa influência variável com a idade do material, que pode ser facilmente mapeada pelas redes neurais artificiais;
- A relação água/cimento se mostrou fortemente relacionada a duas propriedades mecânicas, e que a mesma apresenta uma lei inversa de proporcionalidade com a resistência à compressão.
- As RNA proporcionam uma alternativa eficiente para modelar a carbonatação do concreto, mesmo quando da utilização de redes simples, contendo apenas uma camada de processamento;

Os resultados encontrados na etapa de testes demonstraram a potencialidade das redes na estimativa da profundidade de carbonatação, e que o emprego de RNA apresenta uma viável e eficiente ferramenta para o mapeamento da difusão do CO_2 no concreto. Ademais, os resultados encontrados agregam conhecimento à área de manifestações patológicas, auxiliando no desenvolvimento e estudo da durabilidade e vida útil de estruturas de concreto.

AGRADECIMENTOS

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

REFERÊNCIAS

ACI 209. **Prediction of Creep, Shrinkage and Temperature Effects in Concrete Structures.** American Concrete Institute (ACI) Committee 209, Subcommittee II, 1997.

AKPINAR, P.; UWANUAKWA, I. D. Intelligent prediction of concrete carbonation depth using neural networks. **Bulletin of the Transilvania University of Brasov.** Vol. 9(58), pp. 99-108, 2016.

ANDRADE, C. **Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras.** Trad. De Antonio Carmona e Paulo Helene. São Paulo, Pini, 1992.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – procedimento. Rio de Janeiro, 2014. 238 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 8522: Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão – Concreto.** Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ATIS, C. D. Accelerated carbonation and testing of concrete made with fly ash. **Construction and Building Materials.** Vol 17(3), pp. 147-152, 2003.

BEHNOOD, A.; OLEK, J.; GLINICKI, M. A. Predicting modulus elasticity of recycled aggregate concrete using M50 model tree algorithm. **Construction and Building Materials.** Vol. 94, pp. 137-147, 2015.

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.

BS 8110. **Structural Use of Concrete, Part 2: Code of Practice for Design and Construction.** London, British Structural Institution, 1997.

BURDEN, D. **The durability of concrete containing high levels of fly ash.** Ph.D. Thesis, University of New Brunswick, Canada, 2006.

CARDOSO, C. V.; CRUZ, G. L. Forecasting natural gas consumption using ARIMA models and Artificial Neural Networks. **IEEE Latin American Transactions.** Vol, 17, 2233-2238, 2016.

CARMONA, A. F.; MAREGA, A. Retrospectiva da patologia no Brasil: Estudo Estatístico, in: Jornadas em Español y Portugués sobre Estructuras y Materiales, CEDEX, IETcc, (1988), pp. 325–348, 1988.

CASCUDO, O.; CASAREK, H. **Concreto: Ciência e Tecnologia** Vol. I. Capítulo 24. IBRACON, 2011.

COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON. **CEB-FIP Model Code 1990**. London, Thomas Telford, 1993.

DAL MOLIN, D. C. C. **Fissuras em estruturas de concreto armado: análise das manifestações típicas e levantamento de casos ocorridos no Estado do Rio Grande do Sul**, Dissertação de Mestrado em Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, (1988).

DAS, B. B.; PANDEY, S. P. Influence of fly ash on the carbonation and electrical conductivity of concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**. Vol. 23(9), pp. 1365-1368, 2011.

DUVAL, R. **La durabilité des armatures et du béton d'enrobage, dans (La durabilité des bétons)**. Collection de l'ATHIL. Presse de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, pp. 173–224. ISBN 2-85978-184-6, 1992.

ELOKU, S. O. Model for practical prediction of natural carbonation in reinforced concrete: part 1-formulation. **Cement and Concrete Composites**. Vol. 86, pp.40-56, 2018.

FELIX, E. F.; BALABUCH, T. J. R.; CARRAZEDO, R.; POSSAN, E. **Aplicação de inteligência artificial para a predição de parâmetros mecânicos de concretos com agregado reciclado**. Congresso Brasileiro do Concreto,60.,2018, Foz de Iguaçu.

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.

FELIX, E.F. **Desenvolvimento de software para a estimativa da profundidade de carbonatação, vida útil e captura de CO2 de estruturas de concreto empregando RNA's**. 75f. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu, 2015.

FELIX, E. F.; POSSAN, E. Modeling the Carbonation Front of Concrete Structures in the Marine Environment through ANN. **IEEE Latin America Transactions**, vol. 16, no. 6, pp. 1772-1779, 2018.

FELIX, E. F.; CARRAZEDO, R.; POSSAN, E. Parametric analysis of carbonation process in reinforced concrete structures through Artificial Neural Networks. **Revista ALCONPAT**. Vol. 7(3), pp. 302-316, 2017.

FIGUEIREDO, E.J.; MEIRA, G.R. **Concreto: Ciência e Tecnologia** Vol. I. Capítulo 26. IBRACON, 2011

GOLAFSHANIA, E. M.; BEHNOOD, A. Automatic regression methods for formulation of elastic modulus of recycled aggregate concrete. **Applied Soft Computing**. Vol. 64, pp. 377-400, 2018.

HAMADA, M. Neutralization (carbonation) of concrete and corrosion reinforcing steel. **Proceeding of the 1969 International Symposium on the Chemistry of Cement**, Part III, Vol. II/4, pp. 343–369, 1969.

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

HELENE, P. R. L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. 1993, 213f. Tese (Livre Docência) - Departamento de Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

ISAIA, G. C. Carbonatação do Concreto: uma revisão. **Workshop sobre corrosão da armadura do concreto**, São José dos Campos, 1999.

ISHIDA, T.; MAEKAWA, K. Modeling of pH profile in pore water based on mass transport and chemical equilibrium theory. **Concrete Library of JSCE**. Vol. 37, pp. 151-166, 2001.

IZUMI, I.; KITA, D.; MAEDA, H. Carbonation. **Kibodang Publication**. Vol. n, pp. 35-88, 2014.

JIANG, L.; LIU, Z.; YE, Y. Durability of concrete incorporating large volumes of low-quality fly ash. **Cement and Concrete Research**. Vol. 34(8), pp. 1467-1469, 2004.

KARI, O. P.; PUTTONEN, J.; SKANTZ, E. Reactive transport modelling of long-term carbonation, **Cement and Concrete Composites**. Vol, 52, pp. 42-53, 2014.

KELLOUCHE, Y.; BOUKHATEM, B.; GHRICI, M.; TAGNIT-HAMOU, A. Exploring the Major factors affecting fly-ash concrete carbonation using artificial neural network. **Neural Computing and Applications**. Vol. 13(3), pp. 1-20, 2017.

KHUNTHONGKEAW, T.; TANGTERMSIKUL, S.; LEELAWAT, T. A study on Carbonation depth prediction for fly ash concrete. **Construction and Building Materials**. Vol. 20(9), pp. 744-753, 2006.

KOBAYASHI, K.; UNO, Y. Mechanism of carbonation of concrete. **Concrete Library of JSCE**. Vol. 16, pp. 139-151, 1990.

KÖLIÖ, A.; PAKKALA, T. A.; HOHTI, H.; LAUKKARINEN, A.; LAHDENSIVU, J.; MATTILA, J.; PENTTI, M. The corrosion rate in reinforced concrete facades exposed to outdoor environment, **Materials and Structures**, V.50, pp. 1-16, 2017.

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>>.

KWON, S. J.; SONG, H. W. Mechanism of carbonation behavior in concrete using neural network algorithm and carbonation modeling. **Cement and Concrete Research**. Vol. 40, pp. 119-127, 2010.

LAMMERTIJN, S.; DE BELIE, N. Porosity gas permeability, carbonation and their interaction in high-volume fly ash concrete. **Magazine of Concrete Research**. Vol. 60(7), pp. 535-545, 2008.

LIBERATI, E. A. P.; LEONEL, E. D.; NOGUEIRA, C. G. Influência da corrosão da armadura na capacidade resistente à flexão de vigas em concreto armado: uma abordagem via teoria da confiabilidade estrutural. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, São Paulo, v. 7, n. 3, p. 379-413, 2014.

LU, C.; LIU, R. Predicting Carbonation Depth of Prestressed Concrete under Different Stress States Using Artificial Neural Network. **Advances in Artificial Neural Systems**. Vol. 2009, pp. 1-8, 2009.

LUO, D.; NIU, D.; DONG, Z., **Application of neural network for concrete carbonation depth prediction**. In: 4th International Conference on the Durability of Concrete Structures. West Lafayette, USA, 2014.

MARTINS, C. A. C., **Estimativa da Profundidade de Carbonatação do Concreto com Uso de Redes Neurais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UNICAP, Recife, 2011.

MARTINS, C. A. C., **Estimativa da Profundidade de Carbonatação do Concreto com Uso de Redes Neurais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UNICAP, Recife, 2011.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**, 2ª Edição. São Paulo: IBRACON, 2014.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais**. São Paulo, 4ª edição. Ed. Ibracon, 2014.

MEIRA, R. R.; PADARATZ, I. J.; ALONSO, M. C.; ANDRADE, M. C. Effect of distance from sea and chloride aggressiveness in concrete structures Brazilian coastal site. **Materiales de Construcción**. Vol. 53, pp. 179-188, 2003.

PADMINI, A. K.; RAMAMURTHY, K.; MATHEW, M. S. Influence of parent concrete on the properties of recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**. Vol. 23, pp. 829-836, 2009.

PAPADAKIS, V. G.; VAYENAS, C. G.; FARDIS, M. N. Fundamental modeling and experimental investigation of concrete carbonation. **ACI Materials Journal**. Vol. 88, pp. 363-373, 1991.

PARROT, L. J. A review of carbonation in reinforced concrete. **Cement and concrete Association report**, 1987.

PAULETTI, C.; POSSAN, E.; DAL MOLIN, D. C. C. Carbonatação acelerada: estudo da arte das pesquisas no Brasil. **Ambiente Construído**. Vol. 7, pp. 7-20, 2007.

PAULETTI, C. **Análise comparativa de procedimentos para ensaios acelerados de carbonatação**. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Curso de Pós - graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 176p.

PCA. Types and Causes of Concrete Deterioration. **Portland cement Association**. Illinois, 2002.

POSSAN, E. **Modelagem da carbonatação e previsão de vida útil de estruturas de concreto em ambiente urbano**. 2010. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

REUS, G.C. **Realcalinização química como meio de recuperação de estruturas de concreto armado carbonatadas**. 2017. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2017.

RILEM B3. Creep and shrinkage model for analysis and design of concrete structures: model B3. **Materials and Structures**. Vol. 28, pp. 357-365, 1995.

ROZIÈRE, E.; LOUKILI, A.; CUSSIGH, F. A performance based approach for durability of concrete exposed to carbonation. **Construction and Building Materials**. Vol. 23(1), pp. 190-199, 2009.

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.

SISOMPHON, K.; FRANKE, L. Carbonation rates of concretes containing high volume of pozzolanic materials. **Cement and Concrete Research**. Vol. 37(12), pp. 1647-1653, 2007.

SULAPHA, P.; WONG, S. F.; WEE, T. H. SWADDIWUDHIPONG, S. Carbonation of concrete containing mineral admixture. **Journal of Materials in Civil Engineering**. Vol. 15(2), pp. 134-143, 2003.

TAFFESE, W. Z.; SISTONEN, E.; PUTTONEN, J. CaPrM: Carbonation prediction model for reinforced concrete using machine learning methods. **Construction and Building Materials**. Vol. 100, pp. 70-82, 2015.

TALUKDAR, S.; BANTHIA, N.; GRACE, J. R. Carbonation in concrete infrastructure in the context of global climate change – Part 1: Experimental results and model development. **Cement and Concrete Composites**. Vol. 34, pp. 924–930, 2012.

TUUTTI, K. **Corrosion of Steel** in Concrete. Swedish Cement and Concrete Research Institute. Stockholm, Swedish, 1982. 30p.

UKRAINEZYK, U.; MATUSINOVIÉ U., **Use of Neural Network to Evaluate Rebar Corrosion**. In: Continental Environment, 3th Int. Conf. Construction Materials, Vancouver, 2005.

VAN, P.; DE BELIE, N. Service life based global warming potential for high-volume fly ash concrete exposed to carbonation. **Construction and Building Materials**. Vol. 55(31), pp. 183-193, 2014.

XU, H.; ZHANQING, C.; SUBEI, L.; WEI, H.; DAN, M. Carbonation test study on low calcium fly ash concrete. **Applied Mechanics and Materials**. Vol. 34-35, pp. 327-331, 2010.

ZHANG, P.; LI, Q. Effect of fly ash on durability of high performance concrete composites. **Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology**. Vo l. 6(1), pp. 7-12, 2013.

SOBRE O ORGANIZADOR

CARLOS AUGUSTO ZILLI - Possui graduação em Engenharia Civil e Matemática pela Universidade do Sul de Santa Catarina - UNISUL (2015 e 2005). É doutorando em Engenharia e Gestão do Conhecimento pela Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC (2021) e mestre em Engenharia de Transportes e Gestão Territorial pela Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC (2020). Possui especialização em Avaliação de Imóveis e Perícias de Engenharia pelo Instituto de Pós-Graduação - FAPAN (2018), em Gestão de Obras e Projetos pela Universidade do Sul de Santa Catarina - UNISUL (2017), e em Engenharia de Segurança do Trabalho pelo Centro Universitário de Capivari - FUCAP (2016). É docente no Instituto Federal de Educação de Santa Catarina (IFSC) - Campus São Carlos. Possui experiência na área de Matemática, com ênfase em Educação Matemática e em Engenharia de Avaliações e Perícias, com ênfase em Inferência Estatística. Tem interesse em temas relacionados à Ciência de Dados, Engenharia de Avaliações e Planta de Valores Genéricos.

ÍNDICE REMISSIVO

A

Adições minerais 123, 124, 169, 171, 173, 174, 175, 184, 185, 187
Aditivo natural 189, 191
Agregado miúdo 109, 117, 118, 119, 137, 138, 142, 149, 170, 223, 224, 225, 226, 227, 233, 234, 235, 236, 237, 239, 240, 251
Agregado reativo 169, 173, 185
Algoritmo genético 1, 5
Análise estrutural avançada 43, 44, 45, 48, 49, 60
Argamassa ecológica 237

C

Cinzas de olaria 138
Cisalhamento 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 40, 41, 42, 92, 150, 201, 202, 203, 206, 207, 208, 209, 210, 211, 212, 213, 214, 215, 216, 217, 218, 221, 233
Concreto 1, 3, 4, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 22, 23, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 36, 41, 42, 62, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 74, 75, 76, 77, 78, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 107, 108, 109, 110, 111, 112, 113, 115, 116, 118, 119, 120, 121, 122, 123, 124, 125, 126, 127, 130, 131, 132, 133, 136, 138, 139, 140, 143, 146, 147, 148, 149, 153, 162, 163, 164, 167, 169, 170, 171, 172, 173, 174, 175, 176, 180, 184, 185, 186, 187, 190, 194, 199, 200, 201, 202, 203, 206, 208, 209, 210, 211, 212, 213, 215, 216, 217, 218, 220, 221, 223, 224, 225, 226, 227, 228, 229, 230, 231, 232, 233, 234, 235, 236, 251, 253, 254, 255, 256, 257, 260, 262, 266, 267, 268, 269, 270, 271
Concreto armado 1, 3, 6, 7, 8, 14, 15, 16, 17, 18, 26, 27, 28, 29, 31, 34, 41, 42, 64, 65, 66, 67, 68, 70, 71, 74, 75, 77, 78, 88, 170, 201, 202, 203, 206, 209, 210, 212, 213, 216, 217, 218, 220, 221, 253, 254, 268, 270, 271
Concreto leve 162, 163
Concreto permeável 162
Confiabilidade estrutural 43, 44, 45, 51, 52, 53, 56, 57, 59, 61, 62, 63, 270
Construção civil 1, 3, 67, 107, 109, 125, 126, 127, 136, 137, 138, 139, 140, 149, 151, 152, 153, 155, 156, 157, 158, 160, 161, 162, 163, 167, 170, 189, 191, 202, 205, 223, 224, 225, 226, 234, 235, 237, 239, 244, 251, 252, 254

D

Dimensionamento 1, 3, 4, 7, 8, 9, 10, 11, 13, 15, 16, 18, 19, 20, 22, 23, 26, 27, 28, 29, 33, 34, 36, 41, 64, 65, 69, 74, 77, 78, 210, 211

E

Edificações sustentáveis 152

Engenharia de materiais 137, 152, 189, 235

Engenharia estrutural 2, 79, 80, 82, 83, 91, 92

F

Filler 138, 139, 142

I

Incêndio 16, 17, 18, 19, 20, 22, 23, 25, 26, 27, 130, 133, 136

Inteligência artificial 253, 268

L

Lajes 1, 2, 3, 6, 7, 8, 9, 11, 13, 14, 18, 25, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 39, 40, 41, 42, 65, 67, 84, 87, 93, 206, 244, 245

Lajes lisas 28, 29, 30, 31, 40, 41, 42

Lajes nervuradas 1, 3, 6, 7, 8, 9, 11, 13, 14, 65

Ligações semirrígidas 43, 48, 49, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 60, 61, 62

M

Materiais de construção civil 137, 237

Material compósito 201, 203, 204, 215

Matéria-prima 152, 153, 154, 155, 162, 190, 224, 225, 238, 239

Método de Hertz 16, 18, 19

O

Opuntia ficus-indica 189, 190, 191

Otimização 1, 2, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 13, 14, 15, 46, 64, 65, 66, 67, 68, 70, 71, 75, 76, 77, 189

Otimização estrutural 1, 5

Otimização por enxame de partículas 64, 65, 66, 70, 77

P

Patologia 93, 109, 169, 170, 268

Piso misto de pequena altura 79, 80, 83, 89, 90, 92

Pó de balão 237, 238, 239, 240, 241, 242, 243, 244, 245, 246, 247, 248, 249, 250, 251, 252

Polímero 125, 126, 127, 129, 130, 131, 132, 136, 194, 195, 209, 217, 221

Polistireno expansível 162

Pórticos planos 43, 48, 49, 61

Pós-tensionado 93

Propriedades mecânicas e físicas 125, 127, 136

Punção 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 36, 37, 39, 40, 41, 42

R

RAA 108, 109, 110, 119, 123, 169, 171, 172, 173, 175, 176, 184, 185, 187

Reciclagem 137, 155, 159, 160, 163, 223, 224, 225, 234, 235, 236, 251

Reforço 86, 93, 123, 131, 167, 187, 201, 202, 203, 205, 206, 207, 208, 209, 210, 211, 212, 213, 214, 215, 216, 217, 218, 220, 221

Resíduos da siderurgia 237

Resíduos sólidos 126, 137, 162, 163, 224, 238

Resina poliuretana vegetal 125, 127, 135

S

Simulação numérica 79, 80, 81, 83, 85, 87, 91, 92

Spray drying 189, 190, 191

Sustentabilidade 125, 126, 127, 137, 139, 150, 151, 152, 153, 154, 155, 156, 157, 158, 159, 160, 162, 224, 235, 252

V

Vidro 161, 201, 209, 213, 223, 224, 225, 226, 227, 229, 231, 232, 233, 234, 235, 236

Vigas de concreto armado 15, 16, 26, 64, 65, 66, 74, 78, 201, 206, 216, 218, 221

Vigas T 64, 210


COLEÇÃO DESAFIOS DAS ENGENHARIAS:

ENGENHARIA CIVIL



 www.atenaeditora.com.br

 contato@atenaeditora.com.br

 @atenaeditora

 www.facebook.com/atenaeditora.com.br





 **Atena**
Editora

Ano 2021

COLEÇÃO DESAFIOS DAS ENGENHARIAS:

ENGENHARIA CIVIL



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

 **Atena**
Editora
Ano 2021