

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 Cremo

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
Profª Drª Cristina Gaio – Universidade de Lisboa
Prof. Dr. Daniel Richard Sant’Ana – Universidade de Brasília
Prof. Dr. Deyvison de Lima Oliveira – Universidade Federal de Rondônia
Profª Drª 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
Profª Drª 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
Profª Drª Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins
Prof. Dr. Luis Ricardo Fernandes da Costa – Universidade Estadual de Montes Claros
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Marcelo Pereira da Silva – Pontifícia Universidade Católica de Campinas
Profª Drª 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
Profª Drª Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª 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
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande
Profª Drª 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
Profª Drª Carla Cristina Bauermann Brasil – Universidade Federal de Santa Maria
Prof. Dr. Cleberton Correia Santos – Universidade Federal da Grande Dourados
Profª Drª Diocléa Almeida Seabra Silva – Universidade Federal Rural da Amazônia
Prof. Dr. Écio Souza Diniz – Universidade Federal de Viçosa
Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul
Prof. Dr. Fágner Cavalcante Patrocínio dos Santos – Universidade Federal do Ceará
Profª Drª Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Prof. Dr. 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
Profª Drª Lina Raquel Santos Araújo – Universidade Estadual do Ceará
Prof. Dr. Pedro Manuel Villa – Universidade Federal de Viçosa
Profª Drª Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará
Profª Drª Talita de Santos Matos – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro

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

Ciências Biológicas e da Saúde

Prof. Dr. André Ribeiro da Silva – Universidade de Brasília
Profª Drª Anelise Levay Murari – Universidade Federal de Pelotas
Prof. Dr. Benedito Rodrigues da Silva Neto – Universidade Federal de Goiás
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 Cremo
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
Jacira 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 METACAU LIM 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

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

Data de aceite: 01/07/2021

Data de submissão: 04/06/2021

Maicon de Freitas Arcine

Universidade Estadual de Maringá
Maringá – PR
<http://lattes.cnpq.br/8097716930628529>

Nara Villanova Menon

Universidade Estadual de Maringá,
Departamento de Engenharia Civil, Professor
Associado
Maringá – PR
<https://orcid.org/0000-0002-9943-7864>

RESUMO: Os Polímeros Reforçados com Fibras (PRF) são materiais compósitos inovadores e têm sido usados em muitas estruturas de concreto armado como reforço por apresentarem alta resistência, leveza e propriedades não corrosivas. Esses materiais são compostos por fibras, sejam elas de carbono, vidro, basalto ou aramida, embebidas em uma matriz polimérica. Uma viga reforçada ao cisalhamento com esses materiais possui diversos modos de falha, dentre eles, destaca-se o descolamento da interface devido a fissura crítica de cisalhamento, o que leva a um estudo complexo. Estudos existentes na literatura, nortearam este trabalho que tem por objetivo, revisar e apresentar os avanços e aplicações dos materiais PRF em reforçar vigas de concreto armado sujeitas ao cisalhamento. Inicialmente, foram introduzidas as propriedades fundamentais do PRF e suas formas de

aplicação ao cisalhamento. Apresenta-se uma revisão dos principais estudos experimentais e analíticos sobre o assunto, desde o início da utilização dos materiais compósitos até os dias atuais, destacando os avanços mais relevantes de cada pesquisa. Em todos os estudos, o PRF se mostrou muito eficiente, no entanto, a falha por descolamento ainda se mostrou como um grande problema. Esse fato fez com que os pesquisadores desenvolvessem diversos métodos de ancoragem, os quais, foram eficazes em aumentar a eficiência do reforço.

PALAVRAS-CHAVE: Material compósito. Reforço. Cisalhamento. Vigas de concreto armado.

USE OF COMPOSITE MATERIALS (FIBER REINFORCED POLYMERS IN EXPERIMENTAL RESEARCH ON REINFORCED CONCRETE BEAMS STRENGTHENED TO SHEAR

ABSTRACT: Because of its high strength, lightness and non-corrosive properties, Fiber Reinforced Polymer (FRP) is an innovative composite material and has been used in many RC structures as a strengthening. Such material consists of fibers, whether carbon, glass, basalt or aramid, embedded in a polymeric matrix. A beam strengthening with such material when shearing has several failure modes, among them, the debonding of the interface stands out due to the critical shear crack, which makes the study more complex. Based on existing studies in the literature, this work aims to review and present the advances and applications of FRP materials in strengthening RC beams under to shear. At first,

the fundamental properties of PRF and its main forms of application to shear were introduced. Subsequently, the main experimental and analytical studies on the subject are reviewed, from the beginning of the use of composite materials until today, highlighting the most relevant advances in each research. In all studies, the FRP proved to be very efficient, however, the debonding failure was still a major problem. This fact led the researchers to develop several methods of anchoring, which were effective in increasing the efficiency of the strengthening. **KEYWORDS:** Composite material. Strengthening. Shear. RC beams.

1 | INTRODUÇÃO

O uso do concreto armado trouxe novas e ousadas estruturas, as quais, grandes vão e mudanças de utilização do sistema se tornaram práticas comuns em nossos dias. Além desses, envelhecimento, incêndios, corrosão da armadura, impacto de veículos, erros de projeto, cálculo e construção, podem afetar o desempenho estrutural. Mehta e Monteiro (1994) citam que 40% do total dos recursos da construção civil em países industrialmente desenvolvidos é destinado para recuperação, reforço e manutenção das estruturas existentes. Tal situação tem promovido novos estudos sobre o assunto (EL-SAIKALY; CHAALLAL, 2015; KARZAD et al., 2019; ESLAMI et al., 2020), o que possibilitou o desenvolvimento de técnicas capazes de reabilitar e fortalecer uma estrutura em concreto armado.

Materiais compósitos surgiram como alternativa de reforço para os casos em que emprego dos materiais tradicionais como chapas de aço e concreto não serem adequados. Os FRPs (*Fiber Reinforced Polymer*) ou PRFs (Polímeros Reforçados com Fibras) são materiais compósitos (matriz e reforço) constituídos por fibras embebidas em uma matriz polimérica. De acordo com Machado e Machado (2015), a vantagem desses materiais sobre outros é sua não-corrosividade, alta relação resistência/peso, neutralidade eletromagnética e sua versatilidade na utilização do reforço e reabilitação para estruturas de concreto armado, alvenaria, aço e madeira. O uso dos compósitos tem demonstrado enorme potencial nos últimos 30 anos e tem ganhado espaço em países do oriente, como Japão e China, no continente europeu, em destaque, a Itália e no continente americano, como Estados Unidos e até no Brasil. Segundo dados da ALMACO (Associação Latino-Americana de Materiais Compósitos)¹, em 2016, o setor brasileiro de materiais compósitos consumiu cerca de 159 mil toneladas do material. O campo da construção civil permanece a frente, com 36% desse uso.

As vigas em concreto armado são normalmente projetadas para ter uma resistência ao cisalhamento maior que a flexão, assim, o modo de falha frágil devido a esforços cortantes pode ser evitado. No entanto, essas mesmas estruturas podem se tornar frágeis ao cisalhamento por causa de vários fatores já mencionados. Além disso, quando tais estruturas são reforçadas a flexão, a capacidade de cisalhamento pode se tornar

¹ Disponível em: <<http://almaco.org.br/category/compositos/>>. Acessado em: 02 fev. 2021.

insuficiente (LI; LEUNG, 2016; YU et al., 2019). Logo, o reforço a esforço cortante se torna necessário e muito importante.

Os sistemas compostos têm se revelado eficientes para aumentar a capacidade resistente de peças de concreto armado ao corte (KHALIFA; BELARBI; NANNI, 2000; BEBER, 2003; MENON, 2008). Esse incremento é conseguido através do envelopamento total ou parcial do elemento. As fibras do sistema composto podem ser orientadas transversalmente ao eixo das peças, mas também perpendiculares (ou com diversas inclinações) as potenciais fissuras de cisalhamento, que funcionarão como estribos adicionais. Ademais, podem ser dispostas em várias camadas ou únicas (MACHADO; MACHADO, 2015).

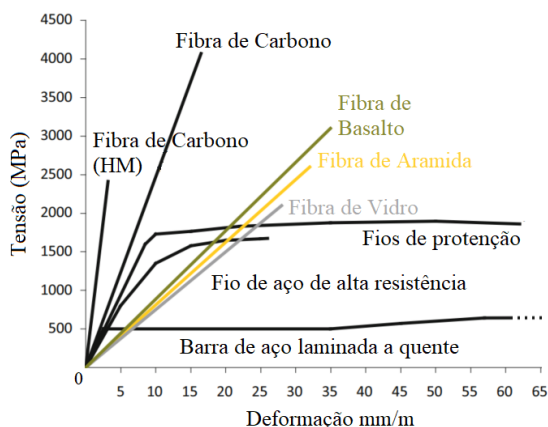
No entanto, apesar do bom desempenho dos materiais compósitos como reforço ao cisalhamento, o risco de colapso da estrutura ainda é uma possibilidade. Colalillo e Sheikh (2014) evidenciaram o descolamento do material de reforço e posteriormente a falha ao cisalhamento da estrutura. Isso pode ser observado entre as extremidades dos laminados, onde há grandes concentrações de tensões nos arredores do reforço. Esse modo de falha é mais observado quando o compósito é aderido ao substrato do concreto lateralmente ou em forma de U. Muitos autores atuais vem desenvolvendo técnicas de ancoragem para evitar esse tipo de falha (BAGGIO; SOUDKI; NOËL, 2014; ESLAMI et al., 2020; SARIBIYIK; ABODAN; BALCI, 2020). Outro modo de falha constantemente observado é a ruptura do PRF, geralmente observado quando há um envolvimento total da viga. Este artigo tem como objetivo apresentar os avanços experimentais de vigas em concreto armado reforçadas com Polímeros Reforçados com Fibras (PRF). Diversos estudos são apresentados, levando em consideração o que foi estudado pelo autor e quais foram os principais destaques.

2 | MATERIAIS COMPÓSITOS

Os compósitos constituem uma classe de materiais heterogêneos, multifásicos, podendo ser ou não poliméricos, em que um dos componentes, descontínuo, dá a principal resistência ao esforço (componente estrutural), e o outro, contínuo, é o meio de transferência desse esforço (componente matricial). Esses componentes atuam concertadamente, e as propriedades do conjunto são superiores às de cada componente individual. A interface entre eles tem influência dominante sobre as suas características. São em geral empregados como materiais de engenharia, formados por elementos de reforço em grau variável de ordenação, que se distribuem em uma matriz flexível (MANO, 2000).

O componente estrutural é responsável pela resistência e rigidez do material compósito, com módulo de elasticidade elevado e alta resistência a tração, dependendo do grau de orientação das fibras. Essas características geralmente são encontradas em fibras. Tais fibras apresentam-se sob a forma de filamentos de pequeno diâmetro de baixa densidade e comportamento frágil.

Os diagramas tensão x deformação de algumas fibras encontradas comercialmente são expostas na Figura 1. Nota-se a diferença de resistência do material carbono principalmente em relação ao aço. O aço apresenta uma rigidez semelhante ao carbono, mas sua ruptura é dúctil e o derivado do petróleo é frágil.



HM: Alto módulo de elasticidade.

Figura 1 - Diagrama tensão x deformação de barras de aço e algumas fibras comerciais.

Fonte: Adaptado de Rousakis (2014).

As matrizes, geralmente, são constituídas de resinas, configuram geometricamente o material compósito garantindo que as fibras funcionem em conjunto. Os esforços são transferidos de umas fibras às outras, protegendo-as das agressões ambientais, dos danos mecânicos e dos fenômenos de instabilidade. As resinas mais utilizadas são as termoendurecíveis da classe dos poliésteres insaturados, do vinil ésteres e do epóxi (MENON, 2008).

Da junção desses componentes (estrutural e matricial) se obtém a família dos *Fiber Reinforced Plastic* (ou Polymer) (FRP), ou seja, Polímeros Reforçados com Fibras (PRF) e as suas relevantes propriedades mecânicas, físicas e químicas. A configuração das fibras no interior da matriz pode ser definida como sendo unidirecionais (fibras orientadas em uma mesma direção), bidirecionais (fibras orientadas em duas direções), orientadas aleatoriamente (esteiras ou descontínua), ortogonais (tecidos), e tridimensionais, quando as fibras são orientadas em um espaço tridimensional (tecidos multidimensionais). A escolha entre um tipo de fibra e uma matriz depende fundamentalmente da aplicação que será dada ao material compósito. O custo também é um fator relevante entre a escolha entre um ou outro componente. Além disso, deve-se observar a compatibilidade entre as fibras e matrizes (MENON, 2008). A representação de um PRF para fibras unidirecionais é apresentada na Figura 2 (a).

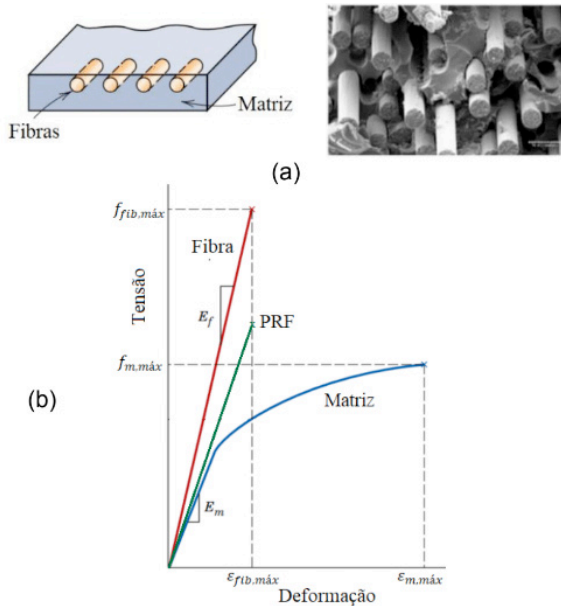


Figura 2 - Tensão x deformação para as fibras, matriz e PRF (a) e representação esquemática de um sistema de PRF para fibras unidirecionais (b).

Fonte: Adaptado de Callister Jr e Rethwisch (2009), Machado e Machado (2015).

Pela Figura 2 (b), a rigidez do PRF é menor que as fibras e falha com a mesma deformação, das próprias fibras, sendo uma característica elástica-linear com ruptura frágil. Enquanto isso, a matriz polimérica possui uma rigidez muito menor, grandes deformações e uma ruptura dúctil (MACHADO, MACHADO, 2015).

As fibras de carbono são as mais rígidas e resistentes dentre as fibras utilizadas para o reforço de polímeros (ROUSAKIS, 2014). Dentre as mais importantes propriedades dos materiais compósitos, destacam-se: Elevada resistência mecânica (comportamento linear até a ruptura), Resistência a fadiga e a cargas cíclicas, Resistência a ataques químicos e à corrosão, por ser um produto inerte e Leveza, devido ao baixo peso específico. Contudo, este material possui boa condutividade elétrica, logo, podem possibilitar corrosão do tipo galvânica quando em contato com metais.

2.1 Sistemas de aplicação

Existem diversas aplicações do PRF na construção civil, em que tais materiais podem promover reforço estrutural. Dentre as aplicações, duas técnicas de reforço se destacam, abreviadas de NSM e EBR. A técnica denominada *Near Surface Mounting* (NSM) refere-se a efetuar cortes mecânicos em regiões dos elementos estruturais a serem reforçados e inserir o material de PRF nestas áreas (MACHADO, MACHADO, 2015) (Figura 3 (a)).

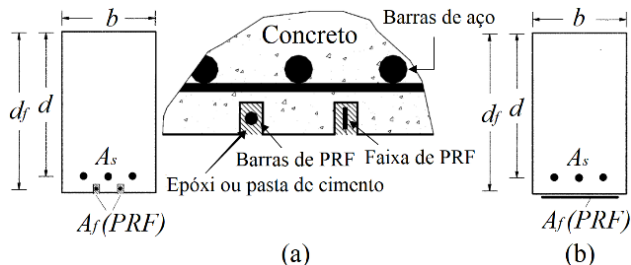


Figura 3 - Near Surface Mounting (NSM) (a) e Externally Bonded Reinforcement (EBR) (b).

Fonte: Adaptado de ACI 440-2R (2008).

A técnica Externally Bonded Reinforcement (EBR) significa a colagem externa de mantas, tecidos ou laminados sem a necessidade de cortes na estrutura (FIB-BULLETIN 14, 2001) (Figura 3 (b)).

Em relação a esforços cortantes, a capacidade de uma viga pode ser aumentada pela colagem externa de mantas, tecidos ou laminados de PRF no concreto. Da mesma maneira que os estribos de aço em vigas de concreto armado, o reforço ao corte introduzido pelo PRF também tem sua geometria e espaçamento regulamentado por normas, como a americana ACI 440-2R (2008) e o documento informativo europeu *fib bulletin 14*. De acordo com o ACI 440-2R (2008), as fibras podem ser orientadas transversalmente ao eixo das peças como perpendiculares (diversas inclinações) as possíveis fissuras de cisalhamento, quando utilizadas em tais reforços. Existem três formas de reforço à cortante, são elas: totalmente na seção transversal (Figura 4 (a)), em forma de U (Figura 4 (b)) e apenas nas laterais da viga (Figura 4 (c)).

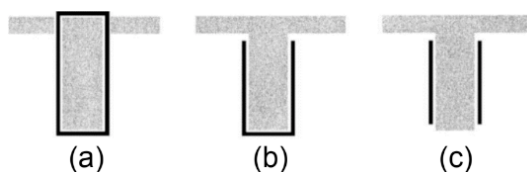


Figura 4 - Configurações possíveis do reforço ao cisalhamento.

Fonte: ACI 440.2R (2008)

A configuração indicada na Figura 4 (a) apresenta a menor vulnerabilidade ao descolamento e alta eficiência, atuando como ancoragem mecânica para reforço à flexão. É recomendada em situações que não possuem lajes em sua parte superior ou inferior. Caso exista esse elemento estrutural (superior ou inferior), tal solução nem sempre é economicamente viável de ser executada, pois há a necessidade de demolições localizadas na laje que está incorporada a viga, de tal forma que possibilitem a passagem do PRF. Já a disposição indicada na Figura 4 (b), devido a existência de laje na parte superior da viga,

acaba sendo a mais utilizada e recomendada. Essa é uma solução de fácil execução e que permite razoável incremento na resistência nominal de cisalhamento da peça. Finalmente, a configuração da Figura 4 (c) será necessária quando a parte superior e a inferior estiverem limitadas a aplicação do PRFC. É a configuração menos eficiente, mesmo com facilidade de aplicação, apresenta limitações de ancoragem. Deve ser evitada sempre que algum dos outros dois esquemas de envolvimento possam ser utilizados (MACHADO, MACHADO, 2015). Como exemplos de aplicações de reforço ao cisalhamento, tem-se na Figura 5 (a), a ponte *Burrard*, construída em 1930-1932 em Vancouver, Canadá. No Brasil, segundo Machado e Machado (2015), o viaduto Santa Tereza (Belo Horizonte, MG), construído em 1927, foi a primeira aplicação do sistema na América Latina em 1998. Esse foi reforçado a flexão e ao cisalhamento, como é apresentado Figura 5 (b).

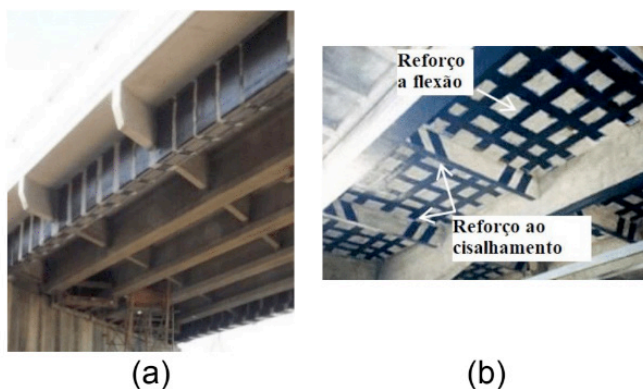


Figura 5 - Ponte *Burrard* (a) e viaduto Santa Tereza (c).

Fonte: *Retro Group*², adaptado de Machado e Machado (2015).

2.2 Falha por descolamento

ANCHRP *Report678* (2011), forneceu um levantamento de 49 estudos experimentais publicados contendo mais de 500 resultados de testes. Esses estudos cobriram todos os resultados relevantes, detalhados e específicos de testes relacionados a reforço ao cisalhamento por PRF (Figura 6).

² Disponível em: <https://retrogroup.ca/portfolio-item/burrard-bridge-concrete/>. Acessado em: 01/02/2021.

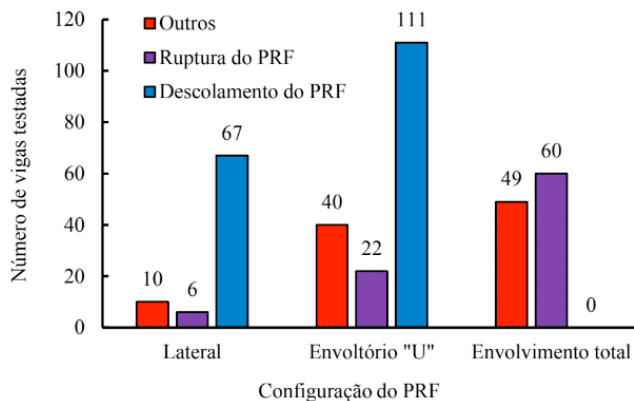


Figura 6 - Modos de falha relacionados à configuração de reforço externo ao cisalhamento.

Fonte: Adaptado de NCHRP *Report* 678 (2011).

Nota-se pela Figura 6 que a descolagem é o modo de falha dominante para o PRF colado lateralmente e em U. Os outros modos de falha se dividem em: ruptura do PRF, tensão diagonal no material de reforço, falha de compressão de cisalhamento na zona de compressão e falha na flexão. Em sistemas com envoltório completo a descolagem quase nunca foi observada.

Em aplicações externas, a resina epóxi atua como um material de interface ligando o reforço ao concreto, desenvolvendo adesão sob a forma de forças de resistência à tração e ao cisalhamento. Como resultado, tem-se um sistema composto que depende da ligação entre a superfície do concreto e as lâminas de PRF (BSISU; HUSSEIN; SARGAND, 2017). As tensões de cisalhamento no concreto são transferidas para os laminados pelo adesivo, que geralmente, são influenciadas pelas propriedades físicas e mecânicas do PRF, concreto e adesivo (BELARBI; ACUN, 2013).

Um processo de descolagem de sistemas em U pode ser observado na Figura 7, com um comprimento de ligação disponível, medido entre o plano de fissura e a borda livre da viga. O processo se inicia em uma fissura quando as tensões são induzidas ao PRF por meio da interface (adesivo), como na Figura 7 (a). Com o alargamento da trinca, as tensões da interface aumentam ao longo do comprimento efetivo da ligação (L_e) até que a tensão de pico (τ_{pico}) seja atingida (Figura 7 (b)). A descolagem local ocorre perto da fissura, onde o pico de tensão foi atingido e o comprimento efetivo necessário para transferir tensões migra para longe da área descolada (Figura 7 (c)). Essa separação intermediária continua em direção a borda livre até que um comprimento de ligação insuficiente seja alcançado e não seja mais possível a transferência de tensões, consequentemente a falha da interface (Figura 7 (d)).

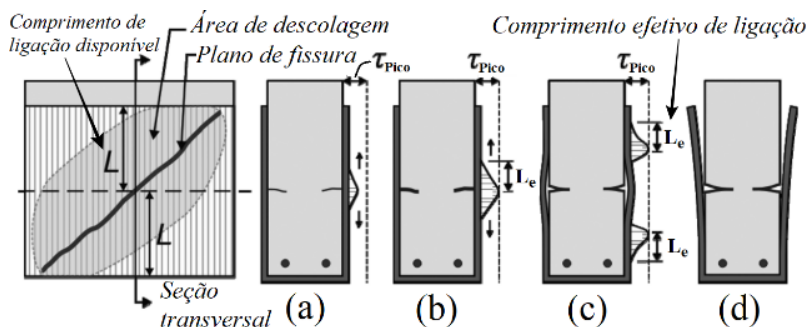


Figura 7 - Processo de descolagem de vigas em concreto armado reforçadas ao cisalhamento em U.

Fonte: Adaptado de Colalillo e Sheikh (2014).

Todo esse sistema também vale para vigas reforçadas lateralmente. Para envolvimento total de uma viga em concreto armado, o PRF continuaria transferindo tensões diretamente sobre a área intermediária até que se rompa (COLALILLO; SHEIKH, 2014).

3 I ESTUDOS EXPERIMENTAIS USANDO TÉCNICAS DE REFORÇO EXTERNA (EB) E NSM AO CISALHAMENTO COM PRF

Desde 1940, os materiais compósitos desempenham funções estruturais importantes no campo da engenharia militar, aeroespacial, náutica, ferroviária e automobilística (JUVANDES, 1999). Sua utilização como reforço em estruturas de concreto, em substituição do aço, deu início na década de 50 (SOUZA, RIPPER, 1998). Na década de 70, pesquisas e desenvolvimentos do PRF iniciaram na Europa, assim como na América do Norte e Japão. Os produtos comerciais tornaram-se gradualmente disponíveis a partir do final dos anos 70, seguindo as primeiras aplicações práticas em estruturas de concreto em meados dos anos 80 (demonstração e projetos). Os primeiros estudos baseados no comportamento do PRF foram realizados por laboratórios Suíços EMPA, pelo pesquisador Meier (1987) (MATTHYS, 2000). O autor usou laminados pré-fabricados de PRFC para estudo, colados sobre o concreto, usando adesivos epóxi, até então, usados apenas em reforço com chapas de aço coladas. Os resultados demonstraram excelente desempenho desta técnica de reforço (BEBER, 2003). Segundo Meier (1997), a primeira aplicação de um sistema de reforço com PRF ocorreu na Alemanha, na ponte *Kattenbusch Bridge* de 478 m, entre 1986 e 1987, onde utilizaram 20 tiras de laminados de polímero reforçado com fibras de vidro (PRFV). Desde então, o uso do PRF como reforço estrutural ganhou força.

Os primeiros estudos experimentais se concentraram em analisar vigas reforçadas a flexão, como o trabalho de Plevris e Triantafyllou (1994). Mas nos anos seguintes, Norris, Saadatmanesh e Ehsani (1997) e Grace et al. (1999) estudaram o reforço ao cisalhamento e apresentaram em seus resultados, que o aumento de carga e o modo

de falha estão relacionados com a orientação das fibras e disposição dos reforços. Ademais, o uso adequado de fibras horizontais e verticais pode dobrar a capacidade de carga ao cisalhamento final da viga e adicionar ductilidade a estrutura. Em 1998, Malek e Saadatmanesh (1998) se basearam em experimentos anteriores e propuseram equações para estimar as tensões interfaciais normais e de cisalhamento. Ainda no mesmo ano, Triantafillou (1998) estudou diversas vigas analisadas por inúmeros pesquisadores. Fundamentado nisso, o autor propôs equações de dimensionamento, onde hoje são adotadas por códigos normativos como a *fib-bulletin* 14 (2001) e ACI 440.2R-08 (2008). Posteriormente, Triantafillou (1998) realizou um estudo experimental sobre o assunto. O pesquisador concluiu que o descolamento/destacamento do PRF e a ruptura do mesmo são os principais modos de falha, dependendo, principalmente, das condições de ligação e sistema de ancoragem do reforço. Portanto, os tecidos não são completamente solicitados, devido a tais modos de falha.

No ano 2000, Khalifa e Nanni (2000) observaram que o uso de mais camadas de reforço não aumenta consideravelmente a resistência da estrutura. Posteriormente, Khalifa, Belarbi e Nanni (2000) e Khalifa e Nanni (2002) realizaram um novo programa experimental, envolvendo vigas T e retangulares reforçadas ao cisalhamento com PRFC. Ambas as pesquisas citam a relação entre o compósito de reforço e os estribos internos. Além disso, foi confirmado que o compósito pode ser usado para reforçar vigas contínuas e a proporcionalidade da contribuição dos tecidos foi atribuída ao vão de cisalhamento (λ)³. Em 2001, De Lorenzis e Nanni (2001) usaram barras de PRFC para reforçar vigas T de concreto armado ao cisalhamento, por meio da técnica NSM (Figura 8). O método se mostrou eficiente para vigas sem estribos em aço, com ganhos de resistência entre 27,6% - 105,6%. Com a adição da armadura transversal em aço, a resistência aumentou em 35%. Os autores enfatizam que para evitar o modo de falha como descolamento das barras, deve-se diminuir seu espaçamento e manter a inclinação em 45°.

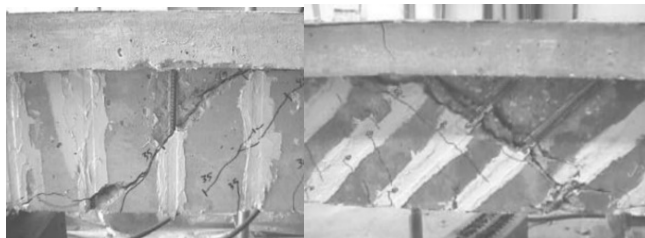


Figura 8 - Experimento de De Lorenzis e Nanni (2001).

Fonte: De Lorenzis e Nanni (2001).

3 a é a distância da aplicação de carga ao apoio e d representa a altura efetiva da seção transversal da viga.

Teng et al. (2002), após uma extensa revisão bibliográfica, desenvolveram um modelo analítico para determinar a contribuição do reforço externo em PRFC, válido para reforço em faixas e contínuo. Os autores enfatizam que o uso de laminados em faixas apresenta maior flexibilidade no uso, no entanto, sua aplicação é mais trabalhosa. Já os tecidos em forma contínua são mais fáceis de se aplicar, contudo, reduz a flexibilidade no controle da quantidade de PRFC. Outra afirmação feita por Teng et al. (2002) é que o uso de fibras bidirecionais, laminados e tecidos em posições $0^\circ/90^\circ$ ou $45^\circ/135^\circ$ é mais efetivo que o uso das fibras inclinadas a 45° para combater fissuras de cisalhamento, contudo, requer uma maior quantidade de fibras.

Carolin (2001) e Carolin (2003) mostraram a possibilidade de aumentar a resistência ao cisalhamento em até 175% com reforço. A não uniformidade das deformações e o descolamento prematuro provocaram uma superestimação da capacidade resistente calculada por métodos analíticos. Já em estudos experimentais executados por Beber (2003), a capacidade ao cisalhamento dos ensaios chegou até 255,6%. Novamente, segundo o autor, o modo de falha predominante foi o descolamento da interface.

Conhecendo a interação entre os estribos de aço e o reforço em PRF, já observado por pesquisadores anteriormente, Mohamed Ali, Oehlers e Seracino (2006) enfatizam que os materiais compósitos aderidos externamente ao substrato de concreto funcionam como as armaduras transversais em aço. Contudo, o aço está ancorado e possui características flexíveis, podendo atingir o escoamento, enquanto isso, o PRF externo pode se descolar, devido as deformações e formações de fissuras de cisalhamento. Portanto, não há garantias que as forças cortantes verticais de pico em ambos os materiais, coincidam. Sabendo disso, os autores desenvolveram um modelo analítico para quantificar essa interação de cisalhamento.

Em ambas as pesquisas de Pellegrino e Modena (2002, 2006), foi comprovado que a armadura transversal em aço tem um efeito significativo na eficácia do reforço ao cisalhamento, as quais, não foram consideradas em nenhuma recomendação de dimensionamento. A simplificação das normas superestima a contribuição do compósito na resistência ao cisalhamento, ao qual, não é apenas dependente das características geométricas e mecânicas do PRF, mas também da armadura transversal em aço. Ainda em 2006 e dando continuidade em 2008, Pellegrino e Modena se basearam nas observações experimentais e desenvolveram um modelo analítico, que permite estimar as contribuições interativas entre a capacidade de cisalhamento dos estribos e do reforço em PRF.

No mesmo ano, em 2008, Menon (2008) observou que os protótipos reforçados com laminados embutidos no sentido da espessura da lâmina (Figura 9 (a)) tiveram um ganho de até 538,74% em sua resistência. Esses, tiveram a menor quantidade de reforço e obtiveram o maior acréscimo de carga, semelhante as vigas envoltas totalmente, logo, é o mais recomendado. Em contrapartida, o autor não recomenda o uso do sistema de laminados colados nas laterais e embutidos no sentido da largura, pois apresentaram uma

maior variabilidade nos resultados. Outra observação importante foi quando os laminados aderidos sobre os estribos descolaram e observou-se uma fissura diagonal de cisalhamento, enquanto o reforço entre a armadura transversal se rompeu por flexão e não descolou. No ano seguinte, El Maaddawy e Sherif (2009) avaliaram vigas em concreto armado com aberturas reforçadas ao cisalhamento com tecidos de PRFC (Figura 9 (b)). Foi observado que o ganho de resistência máximo (72%) ocorreu quando a abertura foi na parte superior da viga. Já quando essa foi posicionada no meio do vão, o aumento da rigidez foi notável. Além disso, com uma abertura de 200mm, a rigidez era ainda maior que a viga sem reforço com abertura de 150mm.

Em seus estudos, Lee et al. (2011) notaram que a orientação $0^\circ/0^\circ$ foi o único teste que não apresentou falha devido a diagonal de compressão. Contrária aos outros testes, a dupla camada horizontal ($0^\circ/0^\circ$) forneceu maior contribuição na resistência ao cisalhamento. No ano seguinte, Jalali et al. (2012) propuseram um novo sistema de reforço em NSM com PRF feito manualmente. O método se baseia em hastes de madeira envolvidas por folhas de PRFC (Figura 9 (c)), nomeada de *Manually Made FRP* (MMFRP). A nova técnica de reforço ao cisalhamento foi eficaz e mudou o modo de falha de descolagem, para uma fissura crítica de cisalhamento, seguido da separação da cobertura de concreto.

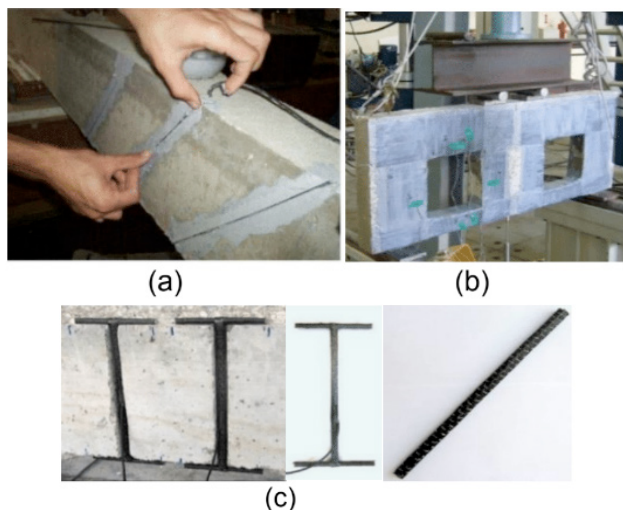


Figura 9 – Experimentos de Menon (2008) (a), El Maaddawy e Sherif (2009) (b) e Jalali et al. (2012) (c)
Fonte: Menon (2008), El Maaddawy e Sherif (2009), Jalali et al. (2012)

Em 2015, El-Saikaly e Chaallal (2015) realizaram testes de vigas reforçadas ao cisalhamento sujeitas a cargas cíclicas. Os pesquisadores observaram que esse sistema de fortalecimento também é eficaz para carregamentos de fadiga. Outro ponto importante, foi a existência de interação entre o reforço e os estribos internos de aço para vigas sujeitas

a cargas cíclicas. No ano seguinte, Mofidi et al. (2016) propuseram um novo modelo matemático para prever a contribuição ao cisalhamento das barras de PRF (reforço NSM). O modelo mostrou uma maior precisão em comparação com os existentes na literatura.

Karzad et al. (2017, 2019) examinaram vigas retangulares em concreto armado já danificadas reparadas com epóxi e, posteriormente, reforçadas com tecidos de PRFC. Em ambos os estudos, os pesquisadores observaram a descolagem como principal forma de falha. No entanto, o reforço aumentou em 95% a capacidade de cisalhamento em comparação com a viga original recuperada, o que comprova a eficiência do reforço externo com PRFC como solução para reparo e reforço de estruturas de concreto armado já danificadas. Assim como estudos anteriores, os autores comprovaram experimentalmente, que a eficácia do reforço é afetada pela quantidade de estribos. Por fim, também afirmaram que o aumento de camadas do compósito não foi proporcional a resistência ao cisalhamento.

Yu et al. (2019) estudaram a influência do grau de pré-fissuração⁴ em vigas retangulares reforçadas ao cisalhamento com tiras de PRFC. Com baixo grau de pré-fissuração, a aderência PRFC/Concreto melhorou. Assim como estudos de Khalifa e Nanni (2002) e Li e Leung (2016), Yu et al. (2019), notaram que com o aumento do vão de cisalhamento (λ), o número de mantas que contribuem no reforço aumenta e não se observa o rompimento do PRFC. Outra observação importante foi a pouca influência do grau de pré-fissuração na rigidez dos testes com os compósitos aderidos no concreto. Para mais, um modelo analítico foi proposto, com a finalidade de estimar a capacidade de cisalhamento do PRFC levando em consideração a distribuição de deformação e o grau de pré-fissuração.

Em seus resultados, Li et al. (2020) afirmaram que, quando a armadura transversal está severamente corroída, a capacidade de cisalhamento não pode ser restaurada pelo reforço com PRFC. Além disso, as normas vigentes não consideram o efeito da corrosão no cálculo do reforço, o que pode superestimar a contribuição ao cisalhamento do compósito para altos níveis de corrosão. No mesmo ano, Benzeguir, El-Saikaly e Chaallal (2020) atribuíram a diminuição da resistência a esforços cortantes ao aumento do tamanho da viga, independente do reforço ser ou não ancorado nas abas de uma viga T. Portanto, existe uma relação entre o nível de contribuição do PRFC e o tamanho da viga.

Ibrahim, Wakjira e Ebead (2020) usaram a técnica NSM com fibras híbridas de Vidro/Carbono para reforçar ao cisalhamento vigas curtas de concreto armado. O sistema híbrido pode ser usado para melhorar a capacidade de carga, aumentar as deflexões e diminuir a largura das fissuras, além de ter aumentado a deformação de tração do aço longitudinal e de compressão na superfície do concreto. Os autores confirmaram a existência da interação entre o sistema híbrido NSM e a armadura transversal em aço. Ademais, um modelo baseado na teoria dos campos de compressão modificada (MCFT em inglês) foi usado para prever a capacidade de cisalhamento das vigas testadas.

⁴ Dano inicial adicionado aos testes até surgirem pré-fissuras, sendo esse carregamento menor que a capacidade das vigas. A relação entre a carga pré-fissurada e a carga máxima suportada é definida como um grau de pré-fissuração.

4 | SISTEMAS DE ANCORAGEM

Como já visto anteriormente, existem três métodos de reforço ao cisalhamento, envoltório total, lateralmente e em U. O método de reforço em U é o mais comum, mas devido ao modo de falha por descolamento, acaba se tornando menos eficiente. Contudo, atualmente se tem realizado diversos testes experimentais para investigar a eficácia de técnicas de ancoragem aplicadas nas extremidades dos compósitos em U. Segundo Godat, Hammad e Chaallal (2020), os sistemas de ancoragem podem ser: extensão do PRF, PRF horizontal em uma extremidade do reforço, cordões de PRF, âncoras metálicas, placas sanduíche, técnicas NSM, entre outros. De início, pode ser destacado o trabalho de Khalifa et al. (1999). O estudo consistiu em desenvolver um novo sistema de ancoragem usando barras de PRF e a técnica NSM (Figura 10). A nova técnica se mostrou eficiente para reforço em U. Esse sistema também foi utilizado em estudos de Micelli, Annaiah e Nanni (2002) e Foster et al. (2016).

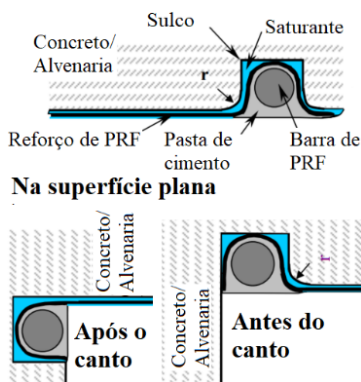


Figura 10 - Sistema de ancoragem proposto por Khalifa et al. (1999).

Fonte: Adaptado de Khalifa et al. (1999).

Tanarslan e Ertutar (2008) avaliaram um sistema de ancoragem para reforço com PRFC ao cisalhamento em sistema U e lateralmente, usando cantoneiras aparafusadas de aço (Figura 11 (a)). Os resultados confirmaram a melhora na resistência a esforços cortantes e na rigidez, além de prevenir o descolamento prematuro dos compósitos. Em outro estudo, Galal e Mofidi (2010) desenvolveram um método de ancoragem semelhante. Tal técnica se baseia em enrolar o PRF em barras de aço e, em seguida, são ancoradas nos cantos das abas da viga T com parafusos mecânicos (Figura 11 (b)). Os resultados mostraram que o sistema foi capaz de eliminar o descolamento do reforço.

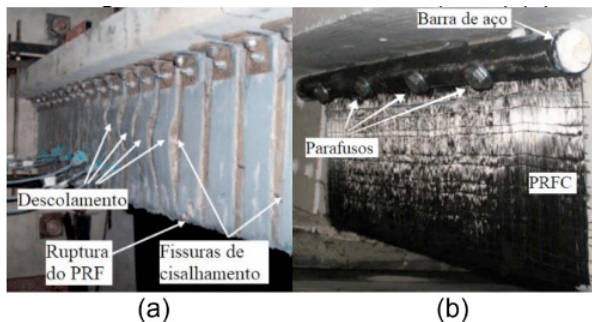


Figura 11 – Método de ancoragem de Tanarslan e Ertutar (2008) (a) e Galal e Mofidi (2010) (b).

Fonte: Adaptado de Tanarslan e Ertutar (2008), Galal e Mofidi (2010).

Kim (2008) propôs um novo método de ancoragem, que se baseia em realizar orifícios sobre o concreto e o compósito, inserir ancoras do mesmo material que o reforço e espalhá-las sobre o PRF (Figura 12 (a)). Nesse estudo, somente reforço a flexão foi realizado, mas em 2009, Quinn (2009) avaliou tal sistema para vigas sujeitas a esforços cortantes. Tal método se mostrou eficiente, principalmente para vão de cisalhamento maior que 2. Os autores também estabeleceram vários requisitos para garantir um bom desempenho das ancoragens. Nos anos seguintes, os estudos de Kim (2011), Koutas e Triantafillou (2012), Baggio, Soudki e Noël (2014) e Saribiyik, Abodan e Balci (2020) também contribuíram para comprovar a eficiência da técnica.

Manos, Katakalos e Kourtides (2011) patentearam um novo sistema de ancoragem. Tal técnica se baseia em enrolar o material compósito em uma barra de aço, essa é então fixada na parte superior do reforço por uma placa de aço aparafusada por dois chumbadores (Figura 12 (b)). Em 2014, Manos, Theofanous e Katakalos (2014) simularam tal sistema de ancoragem. A simulação foi muito satisfatória e conseguiu prever com precisão a resposta estrutural, em termos de capacidade de carga e modos de falha. O sistema de ancoragem foi eficiente.

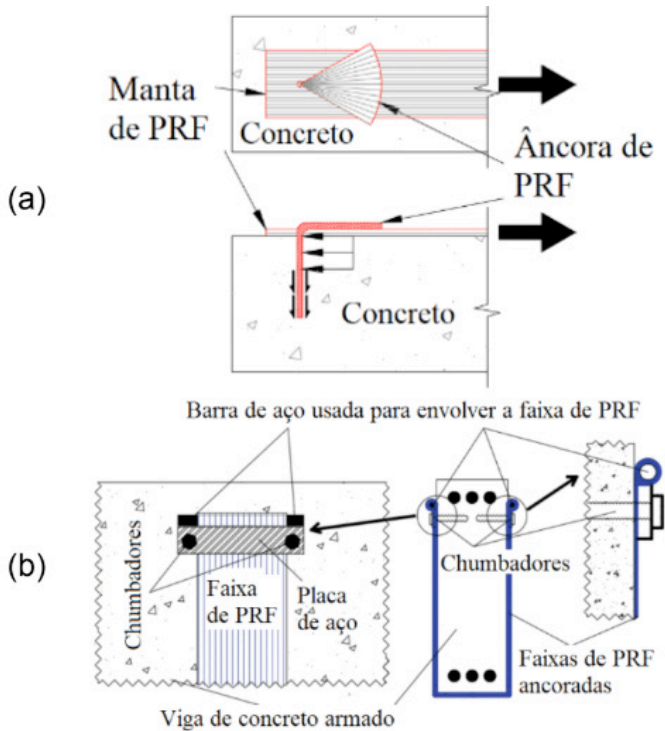


Figura 12 – Âncoras de PRF (a) e ancoragem com chumbadores (b).

Fonte: Fonte: Adaptado de Quinn (2009) e Manos, Theofanous e Katakalos (2014)

Belarbi, Bae e Brancaccio (2012) testaram três métodos de ancoragem, um sistema mecânico (Figura 13 (a)), outro com painéis sanduíche (Figura 13 (b)) e por último com adição de faixas horizontais em PRF na extremidade do reforço (Figura 13 (c)). O uso dos sistemas mecânicos de ancoragem aumentou a resistência ao cisalhamento e atrasou o descolamento. As faixas horizontais também causaram tal efeito, mas não foi tão eficaz quanto as ancoragens mecânicas. O sistema sanduíche foi mais eficiente que a ancoragem mecânica comum, impedindo quase completamente o descolamento do reforço.

El-Saikaly e Chaallal (2015) avaliaram a eficiência de um novo sistema de ancoragem, usando cordões de PRFC. Nesta técnica, os fios do compósito são inseridos em um furo, que atravessa a seção transversal da viga em concreto. As extremidades dos cordões e do reforço em U se encontram, o que transforma o sistema em um reforço total da seção de concreto (Figura 13 (d)). O método eliminou a descolagem do reforço e proporcionou a ruptura dos estribos de aço. Eslami et al. (2020) propuseram um novo sistema de ancoragem (Figura 13 (e)) em vigas de concreto armado reforçadas ao cisalhamento em U com mantas de PRFC. Com a aplicação dessa nova técnica, o modo de falha mudou de cisalhamento frágil para flexão dúctil em todos os testes. Ademais, houve melhoria da capacidade de deslocamento em comparação com o teste sem a aplicação da ancoragem.

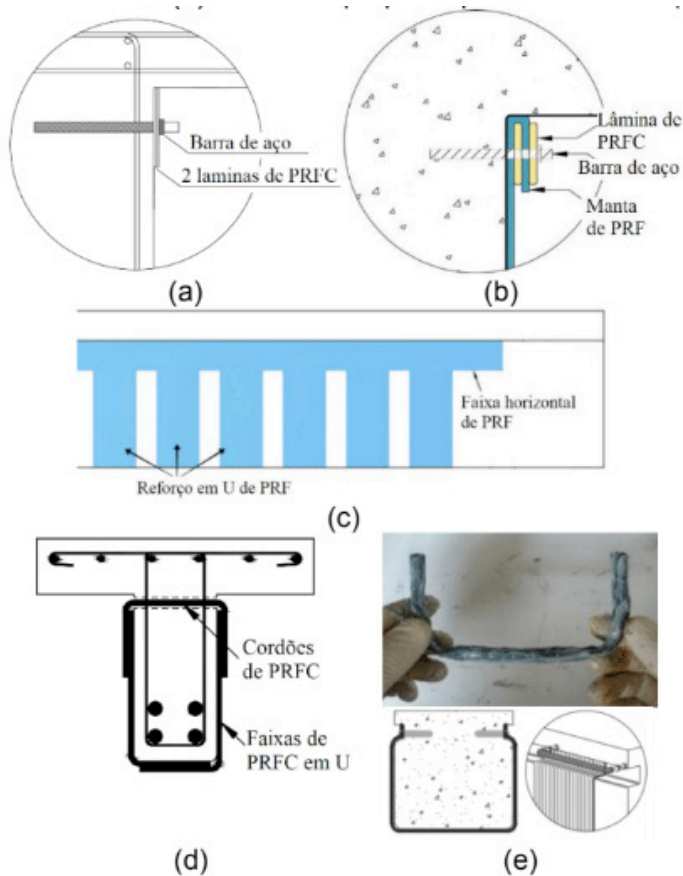


Figura 13 – Ancoragem mecânica (a), painel sanduíche (b), com faixa horizontal em PRF (c), por cordões de PRFC (d) e sistema proposto por Eslami et al. (2020) (e).

Fonte: Adaptado de Adaptado de Belarbi, Bae e Brancaccio (2012), El-Saikaly e Chaallal (2015), Eslami et al. (2020).

5 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foram avaliados diversos estudos experimentais e alguns analíticos sobre reforço ao cisalhamento com PRF de vigas em concreto armado. De forma geral, as observações mais comuns foram: (i) o reforço proporciona ductilidade e aumento da resistência ao cisalhamento, (ii) boa parte dos pesquisadores utilizaram o PRFC (Polímero Reforçado com Fibra de Carbono), (iii) o reforço depende do valor do vão de cisalhamento (a/d), (iv) o reforço horizontal auxilia na prevenção da fissura crítica de cisalhamento, (v) uma grande maioria dos pesquisadores usaram tecidos ou mantas, devido a facilidade de trabalho, (vi) a quantidade de camadas de reforço não aumenta proporcionalmente a resistência ao cisalhamento do sistema, (vii) o reforço externo é fortemente influenciado pelos estribos internos, (viii) boa parte dos estudos analíticos focaram em desenvolver um modelo de

cálculo que considere a presença dos estribos na estimativa da contribuição do reforço, (ix) o predominante modo de ruptura do sistema está ligado ao descolamento do reforço, tanto externo quanto interno (técnica NSM), (x) muitos autores tem focado em métodos de ancoragem capazes de aumentar a contribuição do compósito no reforço ao cisalhamento e evitar a falha por descolamento. Logicamente, essas não são as únicas observações, as demais e, não menos importantes, se encontram no corpo deste trabalho. Diante da extensa aplicabilidade do compósito, muitos estudos ainda devem ser realizados, principalmente quando se trata da sua contribuição na resistência global da estrutura.

REFERÊNCIAS

- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 440.2R-08**: Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures. American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., 2008, 80 p.
- BAGGIO, D.; SOUDKI, K.; NOËL, M. Strengthening of shear critical RC beams with various FRP systems. **Construction and Building Materials**, v. 66, p. 634–644, 2014.
- BEBER, A. J. **Comportamento Estrutural de Vigas de Concreto Armado Reforçadas com Compósitos de Fibra de Carbono**. 2003. 317 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- BELARBI, A.; ACUN, B. FRP systems in shear strengthening of reinforced concrete structures. **Procedia Engineering**, v. 57, p. 2–8, 2013.
- BELARBI, A.; BAE, S. W.; BRANCACCIO, A. Behavior of full-scale RC T-beams strengthened in shear with externally bonded FRP sheets. **Construction and Building Materials**, v. 32, p. 27–40, 2012.
- BENZEGUIR, Z. E. A.; EL-SAIKALY, G.; CHAALLAL, O. Size effect on RC T-beams strengthened in shear with externally bonded CFRP L-shaped laminates. **Journal of Composites for Construction**, v. 24, p. 1-10, 2020.
- BSISU, K. A. D.; HUSSEIN, H. H.; SARGAND, S. M. The Use of Hashin Damage Criteria, CFRP–Concrete Interface and Concrete Damage Plasticity Models in 3D Finite Element Modeling of Retrofitted Reinforced Concrete Beams with CFRP Sheets. **Arabian Journal for Science and Engineering**, v. 42, n. 3, p. 1171–1184, 2017.
- CALLISTER JR, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Materials Science and Engineering na Intoduction**. 8 ed. USA: John Wiley & Sons, 2009.
- CAROLIN, A. **Strengthening of concrete structures with CFRP: Shear strengthening and full scale applications**. 2001. 137 p. Licentiate Thesis, Department of Civil and Mining Engineering, Division of Structural Engineering, Lulea University of Technology. Lulea, Switzerland.
- CAROLIN, A. **Carbon Fibre Reinforced Polymers for Strengthening of Structural Elements**. 2003. 194 p. Doctoral Thesis, Department of Civil and Mining Engineering, Division of Structural Engineering, Lulea University of Technology. Lulea, Switzerland.

CHEN, G. M.; TENG, J. G.; CHEN, J. F. Process of debonding in RC beams shear-strengthened with FRP U-strips or side strips. **International Journal of Solids and Structures**, v. 49, n. 10, p. 1266–1282, 2012.

COLALILLO, M. A.; SHEIKH, S. A. Behavior of shear-critical reinforced concrete beams strengthened with fiber-reinforced polymer-Experimentation. **ACI Structural Journal**, v. 111, n. 6, p. 1373–1384, 2014a.

COLALILLO, M. A.; SHEIKH, S. A. Behavior of shear-critical reinforced concrete beams strengthened with fiber-reinforced polymer-Experimentation. **ACI Structural Journal**, v. 111, n. 6, p. 1373–1384, 2014b.

DE LORENZIS, L.; NANNI, A. Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beams with Near-Surface Mounted Fiber-Reinforced Polymer Rods. **ACI Structural Journal**, v. 98, n. 1, p. 60 – 68, 2001.

EL-SAIKALY, G.; CHAALLAL, O. Composites : Part B Fatigue behavior of RC T-beams strengthened in shear with EB CFRP L-shaped laminates. **Composites Part B**, v. 68, p. 100–112, 2015.

EL MAADDAWY, T.; SHERIF, S. FRP composites for shear strengthening of reinforced concrete deep beams with openings. **Composite Structures**, v. 89, n. 1, p. 60–69, 2009.

EL, Z. et al. Size Effect of RC T-Beams Strengthened in Shear with Externally Bonded CFRP L-Shaped Laminates. **Journal of Composites for Construction**, v. 24, n. 4, p. 1–10, 2020.

ESLAMI, A. et al. Effect of FRP stitching anchors on ductile performance of shear-deficient RC beams retrofitted using FRP U-wraps. **Structures**, v. 23, p. 407–414, 2020.

FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON. **Fib Bulletin 14**: Externally Bonded FRP Reinforcement for RC Structures. Technical report by task group 9.3 FRP reinforcement for concrete structures, Lausanne, Switzerland, 2001, 138 p.

FOSTER, R. M. et al. Experimental Investigation of Reinforced Concrete T-Beams Strengthened in Shear with Externally Bonded CFRP Sheets. **Journal of Composites for Construction**, v. 21, p. 1–13.

GALAL, K.; MOFIDI, A. Shear Strengthening of RC T-Beams Using Mechanically. **Journal of Composites for Construction**, v. 24, p. 31–39, 2010.

GODAT, A.; HAMMAD, F.; CHAALLAL, O. State-of-the-art review of anchored FRP shear-strengthened RC beams : A study of influencing factors. **Composite Structures**, v. 254, p. 1 - 19, 2020.

GRACE, N. F.; SAYED, G. A.; SOLIMAN, A. K.; SALEH, K. R. Strengthening Reinforced Concrete Beams Using Fiber Reinforced Polymer (FRP) Laminates. **ACI Structural Journal**, v. 96, n. 5, p. 865 – 875, 1999.

IBRAHIM, M.; WAKJIRA, T.; EBEAD, U. Shear strengthening of reinforced concrete deep beams using near-surface mounted hybrid carbon / glass fibre reinforced polymer strips. **Engineering Structures**, v. 210, p. 1 - 16, 2020.

JALALI, M. et al. Shear strengthening of RC beams using innovative manually made NSM FRP bars. **Construction and Building Materials**, v. 36, p. 990–1000, 2012.

JUVANDES, L. F. P. **Reforço e Reabilitação de Estruturas de Betão Usando Materiais Compósitos de “CFRP”**. 1999. 396 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, Portugal.

KARZAD, A. S.; AL TOUBAT, S.; MAALEJ, M.; ESTEPHANE, P. Repair of reinforced concrete beams using carbon fiber reinforced polymer. **MATEC Web of Conferences**, p. 1 – 10, 2017.

KARZAD, A. S. et al. Repair and strengthening of shear-deficient reinforced concrete beams using Carbon Fiber Reinforced Polymer. **Composite Structures**, v. 223, p. 1–10, 2019.

KHALIFA, A et al. Anchorage of Surface Mounted FRP Reinforcement. **Concrete International: Design and Construction**, v. 21, n.10, v. 21, n. 10, p. 49–54, 1999.

KHALIFA, A.; BELARBI, A.; NANNI, A. Shear performance of rc members strengthened with externally bonded FRP wraps. In: **World Conference on Earthquake Engineering**, 2000, Auckland. Proceeding... 2000, p. 1–8.

KHALIFA, A.; NANNI, A. Improving shear capacity of existing RC T-section beams using CFRP composites. **Cement and Concrete Composites**, v. 22, n. 3, p. 165–174, 2000.

KHALIFA, A.; NANNI, A. Rehabilitation of rectangular simply supported RC beams with shear deficiencies using FRP composites. **Construction and Building Materials**, v. 16, p. 135 – 146, 2002.

KIM, I. S. **Use of CFRP to Provide Continuity in Existing Reinforced Concrete Members Subjected to Extreme Loads**. 2008. 478 p. Thesis (Doctor), Faculty of the Graduate School, University of Texas at Austin, Austin.

KIM, I. S. et al. **Shear Strengthening of Reinforced and Prestressed Concrete Beams Using Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) Sheets and Anchors**. Technical Report. p. 325. 2011.

KOUTAS, L.; TRIANTAFILLOU, T. Use of anchors in shear strengthening of reinforced concrete T-beams with FRP. In: **6th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering**, Rome. 2012, p. 1 - 8.

LEE, H. K. et al. Behavior and performance of RC T-section deep beams externally strengthened in shear with CFRP sheets. **Composite Structures**, v. 93, n. 2, p. 911–922, 2011.

LI, W. et al. Shear Behavior of RC Beams with Corroded Stirrups Strengthened Using FRP Laminates : Effect of the Shear Span-to-Depth Ratio. **Journal of Composites for Construction**, v. 24, n. 4, 2020.

LI, W.; LEUNG, C. K. Y. Shear span-depth ratio effect on behavior of RC beam shear strengthened with full-wrapping FRP strip. **Journal of Composites for Construction**, v. 20, n. 3, p. 1–14, 2016.

MACHADO, A. P.; MACHADO, B. A. **Reforço de estruturas de concreto armado com sistemas compostos FRP: Teoria e Prática**. 1 ed. São Paulo: PINI, 2015, 517 p.

MANO, E. B. **Polímeros como Materiais de Engenharia**. São Paulo: Edgard Blücher LTDA, 2000, 197 p.

MANOS, G. C.; KATAKALOS, K.; KOURTIDES, V. **Construction structure with strengthening device and method**. European Patent Office. WO2011073696 (A1). 23 jun. 2011.

MANOS, G. C.; THEOFANOUS, M.; KATAKALOS, K. Numerical simulation of the shear behaviour of reinforced concrete rectangular beam specimens with or without FRP-strip shear reinforcement. **Advances in Engineering Software**, v. 67, p. 47–56, 2014.

MATTHYS, S. **Structural behaviour and design of concrete members strengthened with externally bonded FRP reinforcement**. 2000. 367 p. Thesis (Doctorate in Applied Sciences), Faculty of Engineering, Ghent University, Belgium.

MEHTA, K. P.; MONTEIRO, P. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais**. São Paulo: PINI, 1994. 573 p.

MEIER, U. Repair Using Advanced Composites. **IABSE reports**. v. 999, p. 113 – 124, 1997.

MENON, V. A. **Estudo experimental de sistemas de reforço ao cisalhamento em vigas de concreto armado utilizando-se polímero reforçado com fibras de carbono (PRFC)**. 2008. 327 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas), Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

MICELLI, F.; ANNAIAH, R. H.; NANNI, A. Strengthening of Short Shear Span Reinforced Concrete T Joists with Fiber-Reinforced Plastic Composites. **Journal of Composites for Construction**, v. 6, p. 264–271, 2002.

MOFIDI, A. et al. Investigation of Near Surface Mounted Method for Shear Rehabilitation of Reinforced Concrete Beams Using Fiber Reinforced Polymer Composites. **Journal of Composites for Construction**, v. 20, p. 1–14, 2016.

MOHAMED ALI, M. S.; OEHLERS, D. J.; SERACINO, R. Vertical shear interaction model between external FRP transverse plates and internal steel stirrups. **Engineering Structures**, v. 28, n. 3, p. 381–389, 2006.

NATIONAL ACADEMIES OF SCIENCES: NCHRP Report 678. **Design of FRP Systems for Strengthening Concrete Girders in Shear**. Washington, DC: The National Academies Press, 2011, 129 p.

NORRIS, T.; SAADATMANESH, H.; EHSANI, M. R. Shear and Flexural Strengthening of R/C Beams with Carbon Fiber Sheets. **Journal of Structural Engineering**, v. 123, n. 7, p. 903–911, 1997.

PELLEGRINO, C.; MODENA, C. Fiber Reinforced Polymer Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beams with Transverse Steel Reinforcement. **Journal of Composites for Construction**, v. 6, n. 2, p. 104–111, 2002.

PELLEGRINO, C.; MODENA, C. Fiber-Reinforced Polymer Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beams : Experimental Study and Analytical Modeling. **ACI Structural Journal**, v. 103, n. 5, p. 720–728, 2006.

PELLEGRINO, C.; MODENA, C. An experimentally based analytical model for the shear capacity of FRP-strengthened reinforced concrete beams. **Mechanics of Composite Materials**, v. 44, n. 3, p. 231–245, 2008.

PLEVRIS, B. N.; TRIANTAFIOU, T. C. Time-Dependent Behavior of RC Members Strengthened with FRP Laminates. **Journal of Structural Engineering**, v. 120, n. 3, p. 1016–1042, 1994.

QUINN, K. T. **Shear strengthening of reinforced concrete beams with carbon fiber reinforced polymer (CFRP) and improved anchor details**. 2009. 298 p. Thesis (Master of Science in Engineering), Faculty of the Graduate School, The University of Texas at Austin, Austin.

ROUSAKIS, T. Retrofitting and Strengthening of Contemporary Structures: Materials Used. **Encyclopedia of Earthquake Engineering**, p. 1–15, 2014.

SARIBIYIK, A.; ABODAN, B.; BALCI, M. T. Experimental study on shear strengthening of RC beams with basalt FRP strips using different wrapping methods. **Engineering Science and Technology, an International Journal**, v. 24, p. 192–204, 2020.

TANARSLAN, H. M.; ERTUTAR, Y. The Effects of CFRP Strips for Improving Shear Capacity of RC Beams. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, v. 27, n. 12, p. 1287 – 1308, 2008.

TENG, J. G.; CHEN, J. F.; SMITH, S. T.; LAM, L. **FRP strengthened RC structures**. 1 ed. John Wiley e Sons, LTD, 2001, 266 p.

TRIANAFILLOU, T. C. Shear strengthening of reinforced concrete beams using epoxy-bonded FRP composites. **ACI Structural Journal**, v. 95, n. 2, p. 107–115, 1998.

YU, F. et al. Experimental study on high pre-cracked RC beams shear-strengthened with CFRP strips. **Composite Structures**, v. 225, p. 111163, 2019.

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

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