



Franciele Braga Machado Tullio
Lucio Mauro Braga Machado
(Organizadores)

A Aplicação do Conhecimento Científico na Engenharia Civil

3


Ano 2020

2020 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do Texto © 2020 Os autores

Copyright da Edição © 2020 Atena Editora

Editora Chefe: Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Diagramação: Camila Alves de Cremo

Edição de Arte: Lorena Prestes

Revisão: Os Autores



Todo o conteúdo deste livro está licenciado sob uma Licença de Atribuição *Creative Commons*. Atribuição 4.0 Internacional (CC BY 4.0).

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores. Permitido o download da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

Conselho Editorial

Ciências Humanas e Sociais Aplicadas

Profª Drª Adriana Demite Stephani – Universidade Federal do Tocantins

Prof. Dr. Álvaro Augusto de Borba Barreto – Universidade Federal de Pelotas

Prof. Dr. Alexandre Jose Schumacher – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso

Profª Drª Angeli Rose do Nascimento – Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro

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

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

Prof. Dr. Antonio Isidro-Filho – Universidade de Brasília

Prof. Dr. Carlos Antonio de Souza Moraes – Universidade Federal Fluminense

Profª Drª Cristina Gaio – Universidade de Lisboa

Profª Drª Denise Rocha – Universidade Federal do Ceará

Prof. Dr. Deyvison de Lima Oliveira – Universidade Federal de Rondônia

Prof. Dr. Edvaldo Antunes de Farias – Universidade Estácio de Sá

Prof. Dr. Eloi Martins Senhora – Universidade Federal de Roraima

Prof. Dr. Fabiano Tadeu Grazioli – Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões

Prof. Dr. Gilmei Fleck – Universidade Estadual do Oeste do Paraná

Prof. Dr. Gustavo Henrique Cepolini Ferreira – Universidade Estadual de Montes Claros

Profª Drª Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionele delle Figlie de Maria Ausiliatrice

Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense

Profª Drª Keyla Christina Almeida Portela – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso

Profª Drª Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins

Prof. Dr. Luis Ricardo Fernandes da Costa – Universidade Estadual de Montes Claros

Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte

Prof. Dr. Marcelo Pereira da Silva – Universidade Federal do Maranhão

Profª Drª Miranilde Oliveira Neves – Instituto de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará

Profª Drª Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa

Profª Drª Rita de Cássia da Silva Oliveira – Universidade Estadual de Ponta Grossa

Profª Drª Sandra Regina Gardacho Pietrobon – Universidade Estadual do Centro-Oeste

Profª Drª Sheila Marta Carregosa Rocha – Universidade do Estado da Bahia

Prof. Dr. Rui Maia Diamantino – Universidade Salvador

Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará

Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande

Prof. Dr. William Cleber Domingues Silva – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

Ciências Agrárias e Multidisciplinar

Prof. Dr. Alexandre Igor Azevedo Pereira – Instituto Federal Goiano
Prof. Dr. Antonio Pasqualetto – Pontifícia Universidade Católica de Goiás
Prof. Dr. Cleberton Correia Santos – Universidade Federal da Grande Dourados
Profª Drª Daiane Garabeli Trojan – Universidade Norte do Paraná
Profª Drª Diocléa Almeida Seabra Silva – Universidade Federal Rural da Amazônia
Prof. Dr. Écio Souza Diniz – Universidade Federal de Viçosa
Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul
Prof. Dr. Fágner Cavalcante Patrocínio dos Santos – Universidade Federal do Ceará
Profª Drª Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Prof. Dr. Júlio César Ribeiro – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Profª Drª Lina Raquel Santos Araújo – Universidade Estadual do Ceará
Prof. Dr. Pedro Manuel Villa – Universidade Federal de Viçosa
Profª Drª Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará
Profª Drª Talita de Santos Matos – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Tiago da Silva Teófilo – Universidade Federal Rural do Semi-Árido
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas

Ciências Biológicas e da Saúde

Prof. Dr. André Ribeiro da Silva – Universidade de Brasília
Profª Drª Anelise Levay Murari – Universidade Federal de Pelotas
Prof. Dr. Benedito Rodrigues da Silva Neto – Universidade Federal de Goiás
Prof. Dr. Edson da Silva – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri
Profª Drª Eleuza Rodrigues Machado – Faculdade Anhanguera de Brasília
Profª Drª Elane Schwinden Prudêncio – Universidade Federal de Santa Catarina
Profª Drª Eysler Gonçalves Maia Brasil – Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira
Prof. Dr. Ferlando Lima Santos – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Prof. Dr. Fernando José Guedes da Silva Júnior – Universidade Federal do Piauí
Profª Drª Gabriela Vieira do Amaral – Universidade de Vassouras
Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria
Profª Drª Iara Lúcia Tescarollo – Universidade São Francisco
Prof. Dr. Igor Luiz Vieira de Lima Santos – Universidade Federal de Campina Grande
Prof. Dr. José Max Barbosa de Oliveira Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará
Prof. Dr. Luís Paulo Souza e Souza – Universidade Federal do Amazonas
Profª Drª Magnólia de Araújo Campos – Universidade Federal de Campina Grande
Prof. Dr. Marcus Fernando da Silva Praxedes – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Profª Drª Mylena Andréa Oliveira Torres – Universidade Ceuma
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federaci do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Paulo Inada – Universidade Estadual de Maringá
Profª Drª Renata Mendes de Freitas – Universidade Federal de Juiz de Fora
Profª Drª Vanessa Lima Gonçalves – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande

Ciências Exatas e da Terra e Engenharias

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

Prof. Dr. Alexandre Leite dos Santos Silva – Universidade Federal do Piauí
Prof. Dr. Carlos Eduardo Sanches de Andrade – Universidade Federal de Goiás
Prof^a Dr^a Carmen Lúcia Voigt – Universidade Norte do Paraná
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará
Prof. Dr. Juliano Carlo Rufino de Freitas – Universidade Federal de Campina Grande
Prof^a Dr^a 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^a Dr^a Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba
Prof^a Dr^a Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista

Conselho Técnico Científico

Prof. Me. Abrãao Carvalho Nogueira – Universidade Federal do Espírito Santo
Prof. Me. Adalberto Zorzo – Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza
Prof. Me. Adalto Moreira Braz – Universidade Federal de Goiás
Prof. Dr. Adaylson Wagner Sousa de Vasconcelos – Ordem dos Advogados do Brasil/Seccional Paraíba
Prof. Me. André Flávio Gonçalves Silva – Universidade Federal do Maranhão
Prof^a Dr^a Andreza Lopes – Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento Acadêmico
Prof^a Dr^a Andrezza Miguel da Silva – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia
Prof. Dr. Antonio Hot Pereira de Faria – Polícia Militar de Minas Gerais
Prof^a Ma. Bianca Camargo Martins – UniCesumar
Prof^a Ma. Carolina Shimomura Nanya – Universidade Federal de São Carlos
Prof. Me. Carlos Antônio dos Santos – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Prof. Ma. Cláudia de Araújo Marques – Faculdade de Música do Espírito Santo
Prof^a Dr^a Cláudia Taís Siqueira Cagliari – Centro Universitário Dinâmica das Cataratas
Prof. Me. Daniel da Silva Miranda – Universidade Federal do Pará
Prof^a Ma. Daniela da Silva Rodrigues – Universidade de Brasília
Prof^a Ma. Dayane de Melo Barros – Universidade Federal de Pernambuco
Prof. Me. Douglas Santos Mezacas – Universidade Estadual de Goiás
Prof. Dr. Edwaldo Costa – Marinha do Brasil
Prof. Me. Eduardo Gomes de Oliveira – Faculdades Unificadas Doctum de Cataguases
Prof. Me. Eliel Constantino da Silva – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita
Prof. Me. Euvaldo de Sousa Costa Junior – Prefeitura Municipal de São João do Piauí
Prof^a Ma. Fabiana Coelho Couto Rocha Corrêa – Centro Universitário Estácio Juiz de Fora
Prof. Dr. Fabiano Lemos Pereira – Prefeitura Municipal de Macaé
Prof. Me. Felipe da Costa Negrão – Universidade Federal do Amazonas
Prof^a Dr^a Germana Ponce de Leon Ramírez – Centro Universitário Adventista de São Paulo
Prof. Me. Gevair Campos – Instituto Mineiro de Agropecuária
Prof. Dr. Guilherme Renato Gomes – Universidade Norte do Paraná
Prof. Me. Gustavo Krahl – Universidade do Oeste de Santa Catarina
Prof. Me. Helton Rangel Coutinho Junior – Tribunal de Justiça do Estado do Rio de Janeiro
Prof^a Ma. Jaqueline Oliveira Rezende – Universidade Federal de Uberlândia
Prof. Me. Javier Antonio Albornoz – University of Miami and Miami Dade College
Prof^a Ma. Jéssica Verger Nardeli – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho
Prof. Me. Jhonatan da Silva Lima – Universidade Federal do Pará
Prof. Me. José Luiz Leonardo de Araujo Pimenta – Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria Uruguay
Prof. Me. José Messias Ribeiro Júnior – Instituto Federal de Educação Tecnológica de Pernambuco

Profª Ma. Juliana Thaisa Rodrigues Pacheco – Universidade Estadual de Ponta Grossa
 Profª Drª Kamilly Souza do Vale – Núcleo de Pesquisas Fenomenológicas/UFPA
 Profª Drª Karina de Araújo Dias – Prefeitura Municipal de Florianópolis
 Prof. Dr. Lázaro Castro Silva Nascimento – Laboratório de Fenomenologia & Subjetividade/UFPR
 Prof. Me. Leonardo Tullio – Universidade Estadual de Ponta Grossa
 Profª Ma. Lilian Coelho de Freitas – Instituto Federal do Pará
 Profª Ma. Liliani Aparecida Sereno Fontes de Medeiros – Consórcio CEDERJ
 Profª Drª Lívia do Carmo Silva – Universidade Federal de Goiás
 Prof. Me. Lucio Marques Vieira Souza – Secretaria de Estado da Educação, do Esporte e da Cultura de Sergipe
 Prof. Me. Luis Henrique Almeida Castro – Universidade Federal da Grande Dourados
 Prof. Dr. Luan Vinicius Bernardelli – Universidade Estadual do Paraná
 Prof. Dr. Michel da Costa – Universidade Metropolitana de Santos
 Prof. Dr. Marcelo Máximo Purificação – Fundação Integrada Municipal de Ensino Superior
 Prof. Me. Marcos Aurelio Alves e Silva – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo
 Profª Ma. Marileila Marques Toledo – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri
 Prof. Me. Ricardo Sérgio da Silva – Universidade Federal de Pernambuco
 Prof. Me. Rafael Henrique Silva – Hospital Universitário da Universidade Federal da Grande Dourados
 Profª Ma. Renata Luciane Polsaque Young Blood – UniSecal
 Profª Ma. Solange Aparecida de Souza Monteiro – Instituto Federal de São Paulo
 Prof. Me. Tallys Newton Fernandes de Matos – Faculdade Regional Jaguaribana
 Prof. Dr. Welleson Feitosa Gazel – Universidade Paulista

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)	
A642	<p>A aplicação do conhecimento científico na engenharia civil 3 [recurso eletrônico] / Organizadores Franciele Braga Machado Tullio, Lucio Mauro Braga Machado. – Ponta Grossa, PR: Atena, 2020.</p> <p>Formato: PDF Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader. Modo de acesso: World Wide Web. Inclui bibliografia ISBN 978-65-5706-169-5 DOI 10.22533/at.ed.695200907</p> <p>1. Engenharia civil – Pesquisa – Brasil. 2. Construção civil. I. Tullio, Franciele Braga Machado. II. Machado, Lucio Mauro Braga.</p> <p style="text-align: right;">CDD 338.4769</p>
Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422	

Atena Editora
 Ponta Grossa – Paraná - Brasil
www.atenaeditora.com.br
 contato@atenaeditora.com.br

APRESENTAÇÃO

Em “A Aplicação do Conhecimento Científico na Engenharia Civil 3” trazemos vinte e um capítulos que trazem estudos com boas contribuições para a Engenharia Civil.

Temos vários estudos a respeito da utilização da simulação numérica e computacional na resolução de problemas no projeto e execução de estruturas.

O estudo sobre o comportamento de estruturas utilizando determinados materiais proporciona sua validação como alternativa construtiva. Trazemos também análises a respeito de estruturas submetidas a calor intenso, o que permite otimizar os projetos, considerando situações de incêndio.

Tendo em vista a crescente preocupação com o meio ambiente e a escassez de recursos naturais, torna-se imprescindível os estudos que visem soluções ligadas a otimização na utilização de materiais e desenvolvimento de materiais sustentáveis.

A análise de ferramentas computacionais para o desenvolvimento de projetos de engenharia permite realizar comparativos com a finalidade de subsidiar o projetista a optar por ferramentas mais adequadas e seguras, proporcionando uma melhor qualidade em projetos.

Esperamos que esta coletânea seja útil aos seus estudos. Boa leitura!

Franciele Braga Machado Tullio
Lucio Mauro Braga Machado

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	1
ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DO CONCRETO COM SUBSTITUIÇÃO DO AGREGADO MIÚDO POR RESÍDUO DA SCHEELITA PARA PAVIMENTOS RÍGIDOS	
Manoel Domiciano Dantas Filho Dandara Pereira Moura de Assis Hérculys Guimarães Carvalho Larissa Santana Batista Damião Araújo dos Santos Júnior Jéniffer Paloma da Cruz Leal Nayla Kelly Antunes de Oliveira Adriano Lopes Gualberto Filho Wily Santos Machado Carlos Alexandre da Silva Vieira	
DOI 10.22533/at.ed.6952009071	
CAPÍTULO 2	15
ANÁLISE COMPARATIVA DA ESTABILIDADE GLOBAL DE EDIFICAÇÕES DE CONCRETO ARMADO	
Maurel Dreyer Roberto Domingos Rios	
DOI 10.22533/at.ed.6952009072	
CAPÍTULO 3	32
ANÁLISE DA ESTABILIDADE GLOBAL EM EDIFÍCIOS ALTOS DE CONCRETO ARMADO COM ESTRUTURAS DE LAJES PLANAS	
Camila de Melo Tavares André Felipe de Oliveira Lopes Hildo Augusto Santiago Filho Giuliana Furtado Franca Bono Gustavo Bono	
DOI 10.22533/at.ed.6952009073	
CAPÍTULO 4	48
ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA SÍLICA ATIVA NO DESEMPENHO DO CONCRETO EM SIMULAÇÃO DA AGRESSIVIDADE MARINHA	
André Luiz Louzeiro Carvalho Luciano Carneiro Reis Leandro Almeida Santos Mauricio Cavalcante Cutrim Fonseca Wesley da Cruz Gomes	
DOI 10.22533/at.ed.6952009074	
CAPÍTULO 5	60
ANÁLISE DE MODELOS DE CÁLCULO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO REFORÇADAS AO CISCALHAMENTO COM PRFC	
Daniel Marlon Rodrigues Guedes Ailín Fernández Pérez Paulo Fernando Matos de Santana Luiz Gustavo Dantas Gonçalves Guilherme Sales Soares de Azevedo Melo Marcos Honorato de Oliveira	
DOI 10.22533/at.ed.6952009075	

CAPÍTULO 6	77
ANÁLISE DINÂMICA NA FLAMBAGEM DE UMA COLUNA ESBELTA DE CONCRETO ARMADO COM CRITÉRIOS DA NBR 6118/14	
Alexandre de Macêdo Wahrhaftig Kaique Moreira Matos Magalhães	
DOI 10.22533/at.ed.6952009076	
CAPÍTULO 7	90
ANÁLISE DO COMPORTAMENTO À FLEXÃO DE COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS REFORÇADOS COM TECIDOS ESTRUTURAIS DE FIBRAS DE SISAL	
Sande dos Santos Batista Mariana Santos Nunes Adilson Brito de Arruda Filho Paulo Roberto Lopes Lima Ricardo Fernandes Carvalho José Humberto Teixeira dos Santos Sandro Fábio César	
DOI 10.22533/at.ed.6952009077	
CAPÍTULO 8	99
ANÁLISE ESTRUTURAL E CONSTRUTIVA DA PONTE ESTAIADA DA RODOVIA DO PARQUE – (BR-448)	
Rafael Cariolato Dorneles Paula Manica Lazzari	
DOI 10.22533/at.ed.6952009078	
CAPÍTULO 9	113
ANÁLISE LINEAR E NÃO LINEAR DE UM EDIFÍCIO DE VINTE PAVIMENTOS EM CONCRETO ARMADO	
Fernanda Fonseca Lima Gabriel Rodrigues Gomes Denilda Silva Costa Leonardo Moreira Santana Jaciera Santos Brandão Marcelo Rassy Teixeira	
DOI 10.22533/at.ed.6952009079	
CAPÍTULO 10	125
ANÁLISE LINEAR ELÁSTICA E ANÁLISE NÃO LINEAR FÍSICA DA ESTRUTURA DO EDIFÍCIO DESTINADO À INSTALAÇÃO DE DUAS SEDES ADMINISTRATIVAS DA PREFEITURA DE PARAUAPEBAS APÓS A UTILIZAÇÃO DE REFORÇO PARA REVITALIZAÇÃO DO PRÉDIO	
Denilda Silva Costa Jaciera Santos Brandão Allyson Corrêa Dias Fernanda Fonseca Lima	
DOI 10.22533/at.ed.69520090710	
CAPÍTULO 11	138
ANÁLISE NUMÉRICA COMPARATIVA DE MODELOS APLICÁVEIS AO PROJETO DE LAJES DE CONCRETO	
Edmilson Lira Madureira Eduardo Morais de Medeiros Arthur Leandro de Azevedo Silva Gabriel de Bessa Spinola	
DOI 10.22533/at.ed.69520090711	

CAPÍTULO 12 151

ANÁLISE NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO TERMOMECAÂNICO DE LAJES DE CONCRETO ARMADO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

Andreia Romero Fanton
Luiz Carlos de Almeida
Leandro Mouta Trautwein

DOI 10.22533/at.ed.69520090712

CAPÍTULO 13 164

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

Wesley de Vasconcelos Rodrigues da Silva
Maria de Lourdes Teixeira Moreira

DOI 10.22533/at.ed.69520090713

CAPÍTULO 14 178

COMPUTER AIDED DESIGN VERSUS BUILDING INFORMATION MODELING: APLICAÇÃO EM PROJETOS DE SISTEMAS PREDIAIS

Jayron Alves Ribeiro Junior
Thainá Maria da Costa Oliveira
Moisés de Araujo Santos Jacinto
Bruna da Costa Silva
Mariana de Sousa Prazeres
Paulo Rafael Nunes e Silva Albuquerque
Leticia Maria Brito Silva
Camilla Gomes Arraiz
Marcos Henrique Costa Coelho Filho
Yara Lopes Machado

DOI 10.22533/at.ed.69520090714

CAPÍTULO 15 187

DESLOCAMENTO VERTICAL DE UMA VIGA DE EULER-BERNOULLI: SIMULAÇÕES NUMÉRICAS SOB A HIPÓTESE DO MÓDULO DE ELASTICIDADE PROBABILÍSTICO

Ana Carolina Carius
Alex Justen Teixeira
João Vitor Curioni de Miranda
Leonardo de Souza Corrêa

DOI 10.22533/at.ed.69520090715

CAPÍTULO 16 204

ESTUDO COMPARATIVO ENTRE O MÉTODO DE ENGESSER-COURBON E MODELOS COMPUTACIONAIS EM PONTES EM VIGAS DE CONCRETO ARMADO

Felipe Gomes da Silva
Maria de Lourdes Teixeira Moreira

DOI 10.22533/at.ed.69520090716

CAPÍTULO 17 217

ESTUDO DE CASO EM BRASÍLIA: EDIFICAÇÃO EM DESACORDO COM NORMAS EXECUTIVAS E DE PROJETO

João da Costa Pantoja
Bruno Camozzi Fedato Faria
Nathaly Sarasty Narváez

DOI 10.22533/at.ed.69520090717

CAPÍTULO 18	235
INFLUÊNCIA DO USO DA TECNOLOGIA BIM NA REDUÇÃO DE MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS NA FASE DE CONCEPÇÃO E PROJETO DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO	
Rafael Azevedo Lino	
Orieta Soto Izquierdo	
Iutah Cristal Dezidério de Veras Barbosa	
DOI 10.22533/at.ed.69520090718	
CAPÍTULO 19	251
ENSAIOS DE PROVA DE CARGA EM ACORDO COM A NBR 9607 (ABNT, 2012): ESTUDO DE CASO	
Clayton Reis de Oliveira	
Armando Lopes Moreno Júnior	
Luis Gustavo Simão de Oliveira	
DOI 10.22533/at.ed.69520090719	
CAPÍTULO 20	269
PERÍCIA EM SISTEMA DE TRATAMENTO DE ESGOTO	
Marcelo de Jesus Rodrigues da Nóbrega	
DOI 10.22533/at.ed.69520090720	
CAPÍTULO 21	278
SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO UTILIZANDO O MODELO DE DANO PLÁSTICO	
Paulo César de Oliveira Júnior	
Jerfson Moura Lima	
Bruno Rodrigues Amorim	
DOI 10.22533/at.ed.69520090721	
SOBRE OS ORGANIZADORES	295
ÍNDICE REMISSIVO	296

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO UTILIZANDO O MODELO DE DANO PLÁSTICO

Data de aceite: 01/06/2020

Data de submissão: 06/03/2020

Paulo César de Oliveira Júnior

Faculdade Paraíso do Ceará, Departamento de Engenharia Civil
Juazeiro do Norte – Ceará
<http://lattes.cnpq.br/2368579966963896>

Jerfson Moura Lima

Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental
Brasília – Distrito Federal
<http://lattes.cnpq.br/4244744747948798>

Bruno Rodrigues Amorim

Faculdade Paraíso do Ceará, Departamento de Engenharia Civil
Juazeiro do Norte – Ceará
<http://lattes.cnpq.br/5479891247131951>

RESUMO: Atualmente, inúmeros estudos são desenvolvidos para entender o comportamento de elementos estruturais fabricados com concreto. De modo geral, estes estudos são realizados a partir de ensaios experimentais. Contudo, a modelagem numérica vem consagrando-se como uma eficiente ferramenta no estudo do comportamento de elementos estruturais de concreto armado,

por não demandar muito tempo nem custos, como acontece nos ensaios experimentais, além de oferecer uma investigação minuciosa e pontual dos modelos analisados. Com isso, este trabalho tem como objetivo desenvolver um modelo numérico tridimensional não-linear, utilizando o software ABAQUS, capaz de simular o comportamento de uma viga de concreto armado. Os modelos constitutivos *Concrete Damaged Plasticity* e *Von Mises* foram utilizados para modelar o concreto e o aço, respectivamente. Para calibração e validação do modelo, resultados experimentais foram utilizados. O modelo numérico desenvolvido mostrou-se eficiente e adequado para a simulação do comportamento de vigas de concreto armado.

PALAVRAS-CHAVE: Modelagem numérica, Vigas, Modelos constitutivos, Análise não-linear.

NUMERICAL SIMULATION REINFORCED CONCRETE BEAMS USING THE PLASTIC DAMAGE MODEL

ABSTRACT: Currently, numerous studies are developed to understand the behavior of structural elements fabricated with concrete. In general, these studies are performed from experimental trials. However, the numerical

modeling has been consecrated as an efficient tool in the study of the behavior of structural elements of concrete, not to generate great costs and nor to demand much time, as it happens in the experimental tests, besides offering a detailed and timely investigation of the models analyzed. Therefore, this work aims to develop a non-linear three-dimensional numerical model using ABAQUS software, capable of simulating the behavior of a reinforced concrete beam. Concrete Damaged Plasticity and Plastic constitutive models were used to model concrete and steel, respectively. For calibration and validation of the model, experimental results were used. The numerical model developed proved to be efficient and adequate for the simulation of the behavior of reinforced concrete beams.

KEYWORDS: Numerical modeling, Beams, Constitutive models, Nonlinear analysis.

1 | INTRODUÇÃO

Todo sistema mecânico quando submetido a carregamentos, sejam eles estáticos, dinâmicos, ou de natureza térmica, apresentam uma resposta, contudo prevê-la neste sistema mecânico torna a análise complexa, visto que ela está ligada diretamente com a lei constitutiva do material que faz parte de seus componentes em análise (PEREIRA JUNIOR, 2014).

O concreto armado apresenta um comportamento que se desvia das hipóteses elástico-lineares, mesmo quando submetido a níveis baixos de tensão. Dessa forma, uma melhor modelagem de vigas de concreto armado deve ser baseada em critérios que considerem sua danificação (MARTINS, 2008).

A modelagem do comportamento mecânico do concreto é uma tarefa complexa e desafiadora, especialmente quando é do interesse prever seus padrões de falha, visto que seus mecanismos de falha na compressão e tração são distintos, esmagamento e fissuração, respectivamente (ABU AL-RUB; VOYIADJIS, 2009).

No entanto, o avanço tecnológico dos computadores e o desenvolvimento do método dos elementos finitos, aliado com a não linearidade do problema, tornaram possível a análise computacional de estruturas de forma mais próxima da realidade (LYRA, 2011).

1.1 Justificativa

A modelagem numérica consagrou-se como uma eficiente ferramenta de estudo, por não gerar grandes custos e nem demandar muito tempo, como ocorre com os ensaios experimentais, além de oferecer uma investigação minuciosa e pontual dos modelos analisados (ELLOBODY; YOUNG, 2006).

A partir da validação de um modelo numérico é possível proceder uma série de análises variando-se as características geométricas do modelo computacional, de modo que os resultados encontrados serão próximos da realidade, havendo uma grande economia em ensaios experimentais.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivos gerais

Desenvolver um modelo numérico tridimensional não-linear, utilizando o software ABAQUS, capaz de simular o comportamento de uma viga de concreto armado.

1.2.2 Objetivos específicos

- Implementação do modelo numérico de vigas de concreto armado no software ABAQUS.
- Comparação dos resultados numéricos obtidos com os resultados experimentais verificados por Gomes (2016).
- Estudar as tensões atuantes em cada material ao longo do processo de carga.
- Avaliar a eficiência do modelo constitutivo *Concrete Damaged Plasticity* para a simulação do comportamento do concreto.

1.3 Metodologia

Para o desenvolvimento e simulação dos modelos numéricos de vigas de concreto armado foi utilizado o software ABAQUS. O modelo numérico foi calibrado e validado a partir dos ensaios experimentais realizados por Gomes (2016), procedendo uma comparação entre os resultados experimentais e numéricos de carga-deslocamento nos elementos da viga e da armadura longitudinal.

2 | MODELO CONSTITUTIVO DOS MATERIAIS

Na modelagem numérica uma das características mais importantes é o modelo constitutivo dos materiais utilizados, com a finalidade de descrever o comportamento real desses e assim promover uma análise mais precisa.

2.1 Aço

O aço apresenta um modelo constitutivo elástico-plástico, com escoamento isotrópico. Neste modo a resposta é obtida independente da taxa de deformação. O comportamento axial para o aço, exigido pelo modelo constitutivo de *Von Mises* pode ser definido pela curva tensão-deformação bi-linear (Figura 2.1-a) ou tri-linear (Figura 2.1-b) (LIMA, 2018).

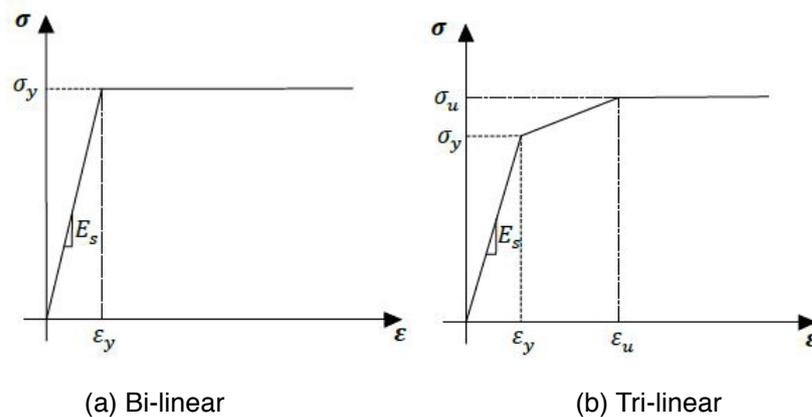


Figura 2.1 – Comportamento uniaxial do aço (NGUYEN; KIM, 2009).

A primeira parte da curva bi-linear é linear elástica, que se estende até que seja atingida a tensão de escoamento do material. A segunda é uma região plástica, onde a tensão permanece constante com variação apenas da deformação. O modelo bi-linear estabelece o comportamento perfeitamente elástico-plástico. Na curva tri-linear, o comportamento é inicialmente elástico, seguindo por um endurecimento e logo após apresenta um escoamento perfeitamente plástico (LIMA, 2018).

2.2 Concreto

Existe uma grande quantidade de modelos constitutivos que descrevem o comportamento do concreto quando submetido à carregamentos, os quais fazem a simulação com a consideração de hipóteses simplificadoras. Os modelos que se baseiam na teoria da plasticidade consideram a existência de um critério de escoamento, uma regra de fluxo plástico e uma regra de endurecimento, que definem a evolução da deformação plástica e conseqüentemente, a evolução da superfície de escoamento durante o processo de carregamento (OLLER, 1988).

O *Concrete Plastic Damaged Model* (Modelo de dano plástico) foi idealizado com o objetivo de englobar todas as particularidades do concreto. Ele realiza o acoplamento da teoria da plasticidade com a mecânica do dano, permitindo assim que seja simulado numericamente a degradação da rigidez e falha do concreto (ABU AL-RUB; KIM, 2010).

O modelo de dano-plástico para o concreto foi desenvolvido por Lubliner *et al.* (1989) e melhorado por Lee e Fenves (1998). Posteriormente, Alfarah, López-Almansa e Oller (2017) apresentaram uma nova metodologia para calcular a evolução das variáveis de dano.

2.2.1 Parâmetros plásticos

Conforme Lima (2018) comportamento do concreto é dependente de quatro parâmetros plásticos constitutivos ($K_c, \varphi, f_{bd}/f_{co}$ e ϵ). Concretos com baixos valores de

ângulo de dilatância (φ) apresentam comportamento frágil, já altos valores proporcionam concretos com alta ductilidade. Alfarah, López-Almansa e Oller (2017) utilizam um ângulo de dilatância $\varphi=13^\circ$, já o parâmetro K_c que consiste na razão entre a tensão desviadora na tração e compressão uniaxial é definido como $K_c=0,7$.

Em suas pesquisas Alfarah, López-Almansa e Oller (2017) e Lopez-Almansa, Alfarah e Oller (2014) assumiram uma razão entre a tensão de início de não linearidade na compressão biaxial e axial (f_{bo}/f_{co}) igual a 1,16 e para a excentricidade da superfície de potencial plástico (ϵ) um valor de 0,1 (Tabela 2.1).

K_c	φ	f_{bo}/f_{co}	ϵ
0,7	13°	1,16	0,1

Tabela 2.1 – Parâmetros plásticos (adaptado de Alfarah, López-Almansa e Oller, 2017).

2.2.2 Compressão

A resistência característica do concreto (f_{ck}) e o módulo de elasticidade secante (E_0) podem ser obtidos a partir das equações estabelecidas por *fib Model Code 2010* (2012) através dos dados de resistência à compressão média (f_{cm}) e do módulo de elasticidade inicial (E_{ci}):

$$f_{cm} = f_{ck} + 8 \quad \text{(Equação 1)}$$

$$E_{ci} = 10000 f_{cm}^{\frac{1}{3}} \quad \text{(Equação 2)}$$

$$E_0 = \left(0,8 + 0,2 \frac{f_{cm}}{88}\right) E_{ci} \quad \text{(Equação 3)}$$

O comportamento uniaxial do concreto quando submetido à compressão é apresentado na figura 2.2.

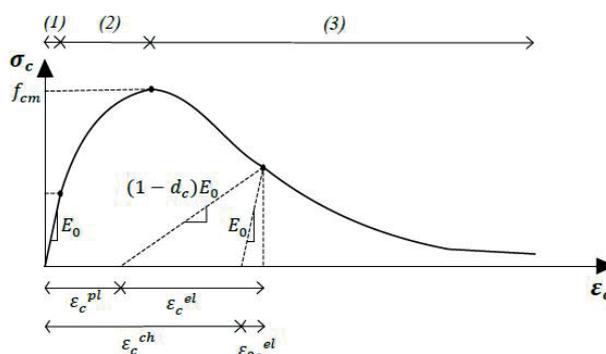


Figura 2.2 – Comportamento uniaxial do concreto à compressão (adaptado de Alfarah, López-Almansa e Oller, 2017).

Cada trecho verificado na curva tensão-deformação do concreto à compressão

descreve um aspecto do comportamento do material quando submetido a um carregamento. Conforme *fib Model Code 2010* (2012) o primeiro trecho estende-se até a tensão de $0,4f_{cm}$ e é linear, o segundo trecho vai de $0,4f_{cm}$ à f_{cm} e o terceiro é o trecho de *softening*. Cada segmento é regido por sua respectiva equação.

Primeiro trecho: $\sigma_{c(1)} = E_0 \varepsilon_c$ Equação (4)

Segundo trecho: $\sigma_{c(2)} = \frac{E_{ci} \frac{\varepsilon_c}{f_{cm}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cm}}\right)^2}{1 + \left(E_{ci} \frac{\varepsilon_{cm}}{f_{cm}} - 2\right) \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cm}}}$ Equação (5)

Terceiro trecho: $\sigma_{c(3)} = \left(\frac{2 + \gamma_c f_{cm} \varepsilon_{cm}}{2 f_{cm}} - \gamma_c \varepsilon_c + \frac{\varepsilon_c^2 \gamma_c}{2 \varepsilon_{cm}}\right)^{-1}$ Equação (6)

$\gamma_c = \frac{\pi^2 f_{cm} \varepsilon_{cm}}{2 \left[\frac{G_{ch}}{l_{eq}} - 0,5 f_{cm} \left(\varepsilon_{cm} (1 - b) + b \frac{f_{cm}}{E_0} \right) \right]^2}$ Equação (7)

$b = \frac{\varepsilon_c^{pl}}{\varepsilon_c^{ch}}$ Equação (8)

2.2.3 Tração

Segundo Qureshi, Lam e Ye (2011), três caminhos distintos podem ser tomados para definir o *softening* na tração. O primeiro consiste em uma aproximação linear, ou seja, após atingindo a resistência a tração máxima, a queda de resistência, em relação a abertura de fissura, ocorre de forma linear (Figura 2.3-a). No segundo, um comportamento pouco mais detalhado é adotado, onde uma função bi-linear é assumida para a perda de resistência (Figura 2.3-b). O terceiro e último caminho (Figura 2.3-c), usado nesse trabalho, é constituído por um método mais realístico, de modo que uma expressão exponencial, proposta por Cornellissen, Hordijk e Reinhardt (1986).

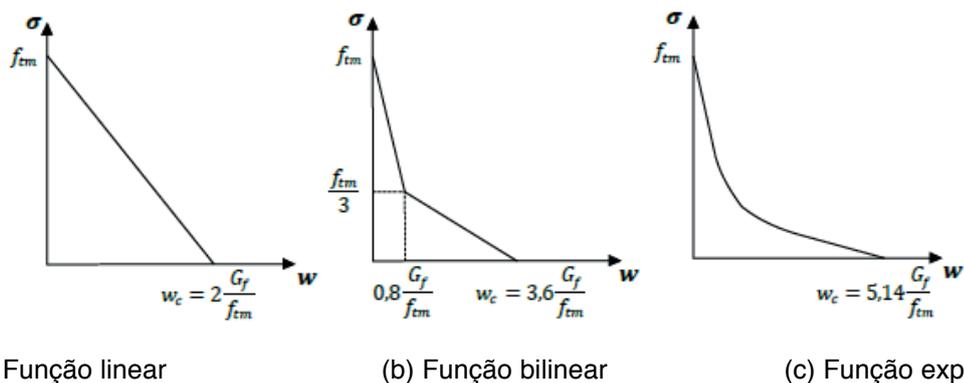


Figura 2.3 - *Softening* na tração em relação a abertura de fissura (adaptado de Qureshi, Lam e Ye, 2011).

Os valores de resistência à tração média (f_{tm}), energia de fratura (G_f) e energia de esmagamento do concreto são definidos conforme as equações:

$$f_{tm} = 0,3016 f_{ck}^{2/3} \quad \text{Equação (9)}$$

$$G_f = 0,073 f_{cm}^{0,18} \quad \text{Equação (10)}$$

$$G_{ch} = \left(\frac{f_{cm}}{f_{tm}} \right)^2 G_f \quad \text{Equação (11)}$$

Cornellissen, Hordijk e Reinhardt (1986) relacionam a tensão com a abertura de fissuras através de uma expressão exponencial, atribuindo $c_1=3$ e $c_2=6,93$. Além disso, estabelece a abertura de fissura crítica (w_c) conforme equação (13).

$$\frac{\sigma_t(w)}{f_{tm}} = \left[1 + \left(c_1 \frac{w}{w_c} \right)^3 \right] e^{-c_2 \frac{w}{w_c}} - \frac{w}{w_c} (1 + c_1^3) e^{-c_2} \quad \text{Equação (12)}$$

$$w_c = 5,14 \frac{G_f}{f_{tm}} \quad \text{Equação (13)}$$

De acordo com Alfarah, López-Almansa e Oller (2017) os valores de deformação que definem o segundo trecho da curva tensão-deformação podem ser obtidos por meio equação (14).

$$\varepsilon_t = \varepsilon_{tm} + \frac{w}{l_{eq}} \quad \text{Equação (14)}$$

O comportamento uniaxial do concreto quando submetido à tração é apresentado na figura 2.4.

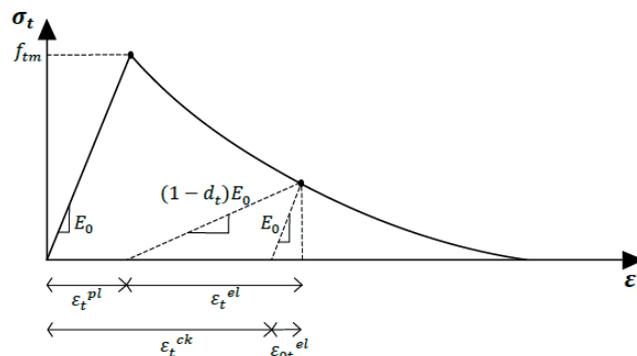


Figura 2.4 - Comportamento uniaxial do concreto à tração (adaptado de Alfarah, López-Almansa e Oller, 2017).

3 | MODELO COMPUTACIONAL

Para a obtenção de resultados consistentes na modelagem numérica, a análise de elementos finitos considerou todas as fontes de não-linearidade dos elementos constituintes da viga estudada. Assim, o refinamento e calibração é norteado pelos resultados reais do ensaio de flexão da viga V_0 de Gomes (2016), afim de se obter um modelo confiável.

3.1 Programa computacional utilizado

Para o desenvolvimento dos modelos e suas simulações foi utilizado o software ABAQUS. Conforme Rojas (2017) este programa proporciona facilidades através de diversos módulos, permitindo analisar os efeitos em estudo.

3.2 Elementos de modelagem

O modelo tridimensional foi definido com base na viga de referência desenvolvida por Gomes (2016), o modelo é composto pela viga de concreto, por dois tipos de armadura longitudinal e pelo estribo, que apresenta uma distribuição não uniforme verificada na figura 3.1, a seção da estrutura é apresentada na figura 3.2. Além disso, foi inserida uma chapa para as regiões de apoio e de aplicação de carga do ensaio de flexão. Todos os valores de comprimento foram inseridos em metro, de modo que as unidades das demais constantes devem estar coerentes.

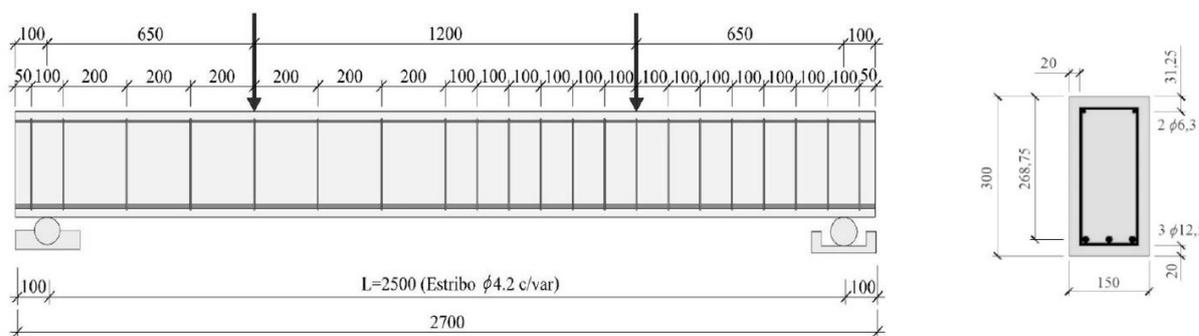


Figura 3.1 – Dimensões da viga modelada (adaptado de Gomes, 2016).

Para cada componente da viga estudada houve a definição no ABAQUS do tipo de elemento conforme a tabela 3.1.

Elemento	Dimensão	Característica
Viga de concreto	3D	Sólido
Armadura longitudinal (12,5)	2D	Treliça
Armadura longitudinal (6,3)	2D	Treliça
Estribo	2D	Treliça
Chapa	3D	Sólido

Tabela 3.1 – Elementos utilizados na modelagem (Autores, 2019).

3.3 Modelo constitutivo dos materiais

3.3.1 Concreto

O comportamento do concreto foi descrito utilizando o *Concrete Damaged Plasticity Model* com a nova metodologia desenvolvida por Alfarah, López-Almansa e Oller (2017). Este modelo é adequado para materiais que possuem distintas resistências à tração e compressão. Cabe salientar que o estudo contempla apenas o carregamento estático, de modo que não foi considerado os parâmetros de dano à tração (d_t) e compressão (d_c). Nos parâmetros do concreto (Tabela 3.2) houve uma adaptação do ângulo de dilatação proposto de 13° para 10°, por proporcionar melhores resultados ao modelo computacional desenvolvido.

No emprego do modelo de dano-plástico foram utilizados os dados de resistência média à compressão e sua respectiva deformação definidos por Gomes (2016) como $f_{cm}=26,89$ MPa e $\epsilon_{fcm}=1,88$ ‰ através do ensaio de compressão axial do concreto.

Módulo de elasticidade (GPa)	Coefficiente de Poisson	Parâmetro plástico	
25,79	0,2	Ângulo de dilatação Excentricidade Rel. tensão Biaxial – Uniaxial Relação 2° invariante Viscosidade	$\varphi=10^\circ$ $\epsilon=0,1$ $f_{bo}/f_{co}=1,16$ $K_c=0,7$ $u=0$

Tabela 3.2 – Parâmetros para o concreto (Autores, 2019).

Os demais dados de tensão e deformação à compressão e à tração foram definidos conforme as equações apresentadas na seção 2.2.

3.3.2 Aço

Neste trabalho foi utilizado um modelo constitutivo elástico-plástico (*Von Mises*) para simular o comportamento mecânico da armadura no concreto. O comportamento uniaxial implementado no modelo consistiu da relação tensão-deformação bi-linear. Deste modo foram utilizados os modelos *Elastic* e *Plastic* disponíveis na biblioteca de materiais do ABAQUS. As propriedades das armaduras (Tabela 3.3) foram definidas por Gomes (2016) por meio do ensaio de tração axial.

Diâmetro (mm)	f_{sy} (MPa)	ϵ_{sy} (‰)	f_{su} (MPa)	ϵ_u (‰)	E_s (GPa)	Coef. Poisson
4,2	609,5	3,02	672,3	10	201,5	0,3
6,3	568,5	2,15	610,2	8,5	264,9	0,3
12,5	610,3	3,05	716,0	10	200,1	0,3

Tabela 3.3 – Propriedades mecânicas das armaduras (adaptado de Gomes, 2016).

3.3.3 Chapa

As chapas utilizadas nas regiões de apoio e de aplicação de carga referente ao ensaio de flexão em quatro pontos foram definidas como elementos de elevada rigidez, para evitar o dano causado à viga de concreto devido à aplicação direta da carga pontual na simulação, de modo que as chapas não devem se deformar. Como sua função é de distribuição da carga, suas dimensões foram definidas com base na largura da viga, assim esta possui 150x150 mm.

3.4 Condições de apoio e restrições

Nas condições de apoio do modelo computacional (Figura 3.2) foram utilizadas as mesmas restrições presentes no trabalho experimental verificadas na figura 3.1. Ambos os apoios foram definidos em linha na chapa, sendo um de primeiro gênero ($U_x=U_y=0$) e o outro de segundo gênero ($U_x=U_y=U_z=0$).

Para descrever o ensaio de 4 pontos da viga no modelo computacional as cargas foram aplicadas em dois pontos, cada um distante 650 mm dos apoios conforme a figura 3.1. Para isso foi aplicada uma chapa em cada região de solicitação, com o objetivo de realizar a distribuição da carga pontual na superfície da viga. No módulo *Load* do ABAQUS foi definida uma carga pontual e no módulo *Step* o tipo *Static, Riks* (Método de análise não-linear).

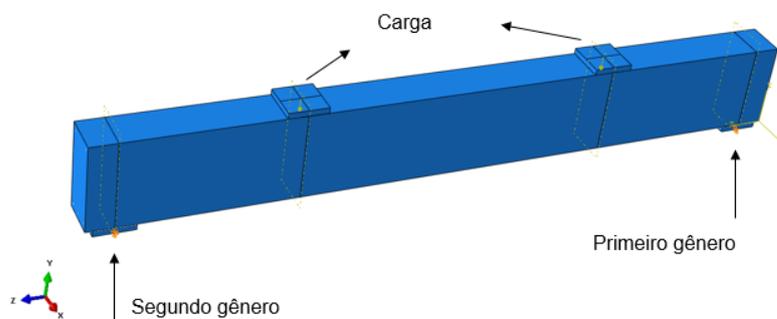


Figura 3.2 – Condições de apoio (Autores, 2019).

Para a consideração da não-linearidade de contato na modelagem o software ABAQUS apresenta o módulo *Interaction*, havendo a definição do tipo de contato entre os elementos constituintes da viga na simulação.

Para simular o contato entre as chapas e as superfícies horizontais do topo e base da viga (Figura 3.3) foi utilizada uma restrição oferecida pelo ABAQUS denominada *Tie*, segundo Rojas (2017) esse tipo de interação considera que não existe deslocamento relativo entre as superfícies envolvidas, gerando uma transferência perfeita de tensões.

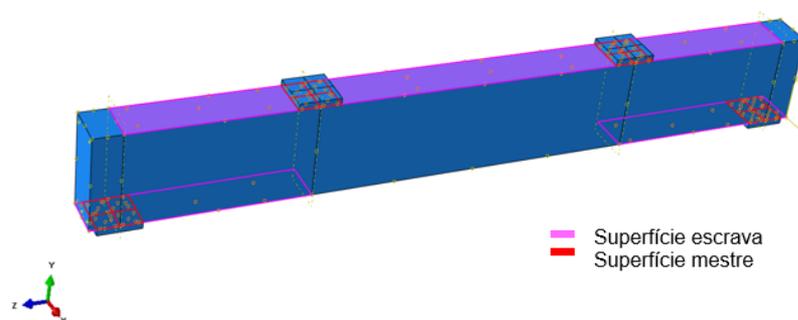


Figura 3.3 – Contato chapa-concreto (Autores, 2019).

Para a armadura longitudinal e transversal (Figura 3.4) foi definido o tipo de restrição *Embedded region* (aderência perfeita) também presente no ABAQUS.

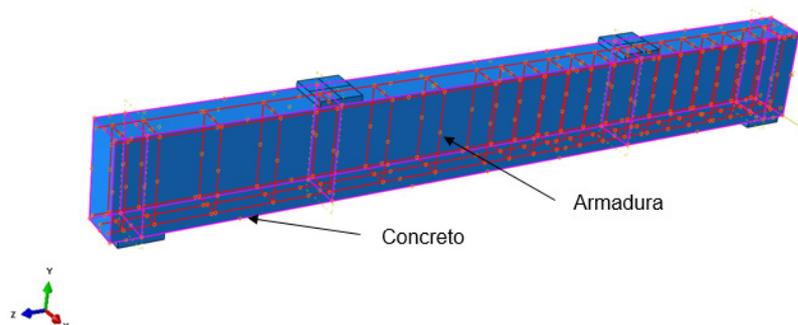


Figura 3.4 – Armaduras embebidas no concreto (Autores, 2019).

3.5 Malhas

No modelo computacional foram analisadas diversas malhas para os elementos. Os resultados apontaram que as malhas grosseiras, bem como as muito refinadas na viga de concreto apresentavam dificuldade de convergência na simulação. A tabela 3.4 apresenta as malhas definidas para os elementos constituintes de viga.

Elemento	Característica	Ordem de interpolação	Nomenclatura	Tamanho (m)
Viga de concreto	Sólido	Quadrática	C3D8R	0,02
Armadura longitudinal (12,5)	Treliça	Linear	T3D2	0,005
Armadura longitudinal (6,3)	Treliça	Linear	T3D2	0,005
Estribo	Treliça	Linear	T3D2	0,005
Chapa	Sólido	Quadrática	C3D8R	0,03

Tabela 3.4 – Características dos elementos finitos (Autores, 2019).

4 | CALIBRAÇÃO DO MODELO

O modelo computacional foi calibrado através da comparação da curva de carga x deslocamento da simulação com a viga V_0 ensaiada por Gomes (2016). Deste modo, os valores devem ser extraídos em pontos coincidentes na simulação e no ensaio experimental com sistema conforme figura 4.1.

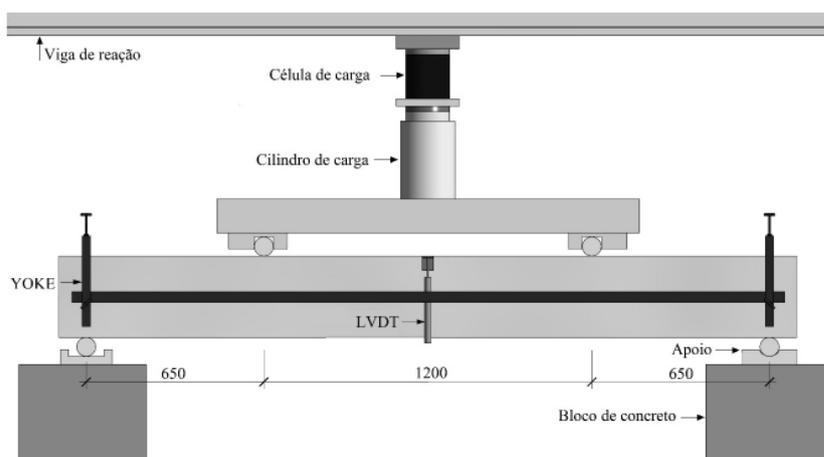


Figura 4.1 – Sistema do ensaio experimental (GOMES, 2016).

O diagrama de carga x deslocamento elaborado por Gomes (2016) apresenta as relações entre a carga aplicada pelo cilindro de carga e o deslocamento medido pelo LVDT no meio do vão da viga. Sendo assim, na simulação os dados de carga extraídos no ponto de aplicação da força na chapa devem ser multiplicados por dois, visto que no sistema de ensaio a força medida é dividida entre os dois pontos de aplicação na viga, e os deslocamentos devem ser extraídos no ponto situado no meio do vão. As curvas geradas (Figura 4.2) na simulação e ensaio apresentam um comportamento semelhante.

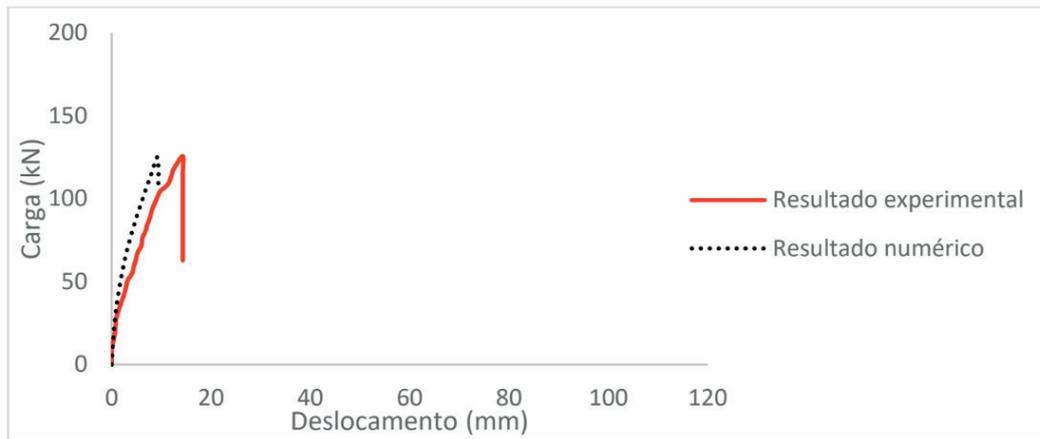


Figura 4.2 – Curva força-deslocamento utilizada na calibração do modelo (Autores, 2019).

A simulação apresentou resultados próximos aos encontrados no ensaio experimental de flexão em quatro pontos (Tabela 4.1). A curva carga-deslocamento numérica se apresentou um pouco mais rígida que a experimental, visto que com relação ao deslocamento (δu) houve uma maior divergência entre o resultado numérico e experimental, o fator que ocasiona isso está provavelmente na relação tensão-deformação, que foram modelados de acordo com as curvas teóricas propostas por pesquisas prévias e por dados obtidos em ensaios experimentais.

Resultado	Vu (kN)	Erro (%)	δu (mm)
Experimental	125,5	0,45	14,32
Numérico	124,93		9,18

Tabela 4.1 – Carga de ruína e deslocamento do resultado numérico e experimental (Autores, 2019).

5 | ANÁLISE DA ARMADURA DE FLEXÃO

A partir da validação do modelo procedeu a análise da armadura longitudinal da viga. Analogamente à curva carga-deslocamento da viga de concreto, a armadura longitudinal também foi analisada de acordo com os pontos verificados no trabalho experimental.

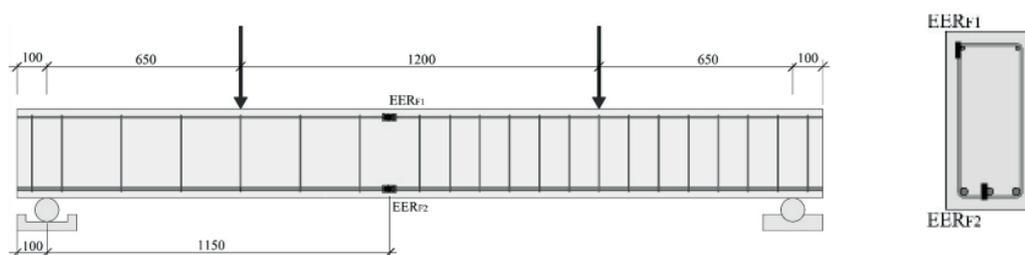


Figura 5.1 – Pontos de análise da armadura longitudinal (adaptado de Gomes, 2016).

A figura 5.1 apresenta os dois pontos instrumentados pela aplicação de extensômetros na armadura (EERf1 e EERf2). Observa-se que o EERf1 está sendo analisado quanto à compressão e o EERf2 à tração. A comparação dos resultados é verificada na figura 5.2.

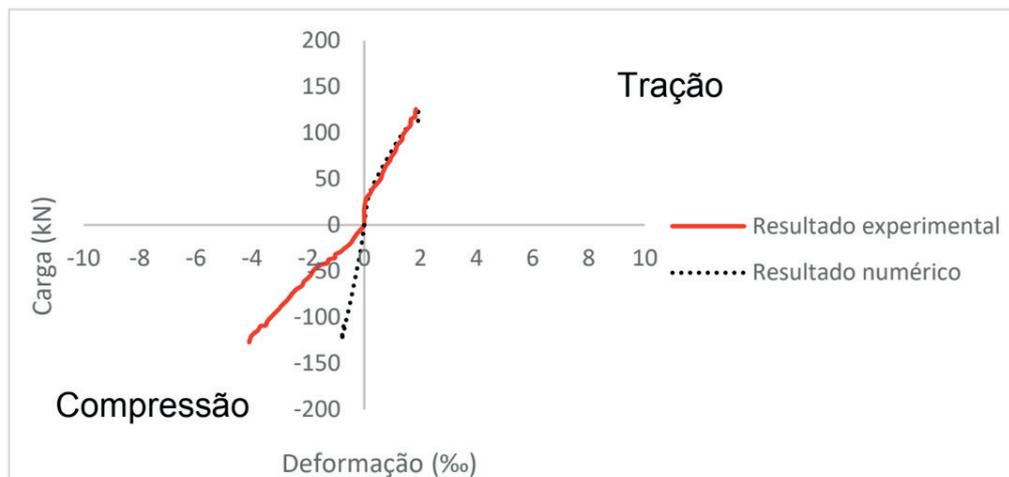


Figura 5.2 – Curvas carga-deformação numérica e experimental para tração e compressão nas armaduras longitudinais (Autores, 2019).

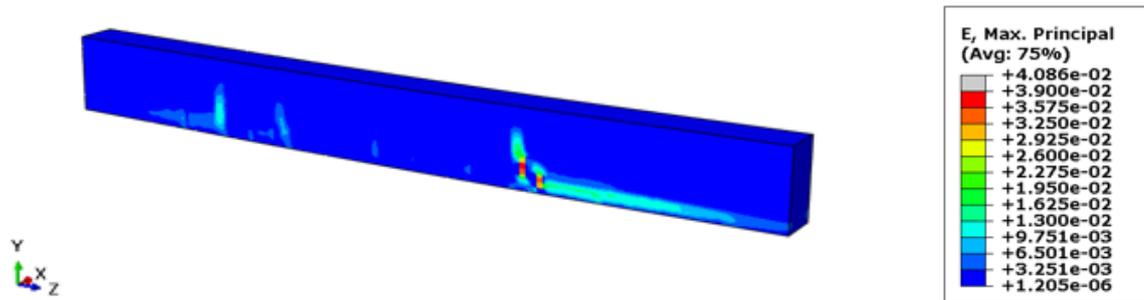
Segundo Gomes (2016) é provável que o registro de deformações de compressão da viga esteja incorreto, visto que a constante angular k_c divergiu dos valores encontrados para as demais vigas ensaiadas em sua pesquisa.

6 | ANÁLISE DA FISSURA MAPEADA

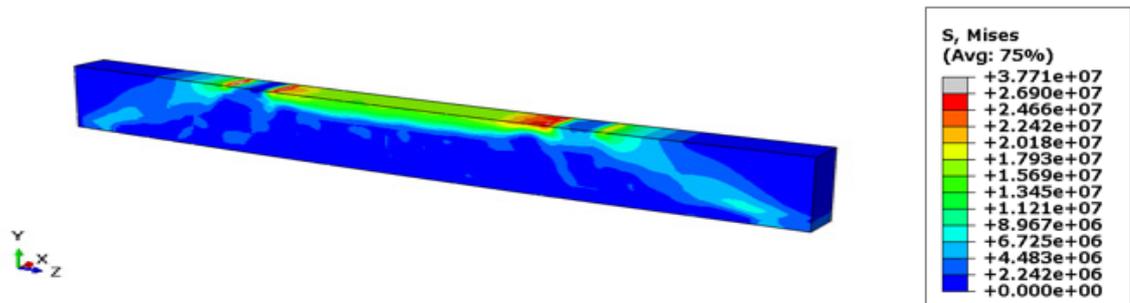
Durante o ensaio de flexão da viga Gomes (2016) realizou o mapeamento das fissuras (Figura 6.1-a), de modo que estes resultados também podem ser utilizados para análise comparativa do estudo experimental e a simulação realizada no ABAQUS.



a) Mapeamento da fissura (GOMES, 2016).



b) Deformação verificada no ABAQUS (Autores, 2019).



c) Tensão verificada no ABAQUS (Autores, 2019).

Figura 6.1 – Desenvolvimento das deformações e tensões na fissura mapeada.

Através da análise das deformações desenvolvidas no modelo numérico é possível perceber onde se encontram as regiões fissuradas. O resultado numérico está de acordo com o mapeamento de fissuras realizado no trabalho experimental, também apresentando maiores valores de deformação na região com maior espaçamento do estribo (Figura 6.1-b). Além disso a modelagem permite perceber o desenvolvimento das tensões na viga (Figura 6.1-c), as quais ocorrem com maior intensidade na região de maior fissuração.

No geral, nota-se que a viga apresenta um modo de ruptura característico do cisalhamento, onde uma fissura de aproximadamente 45° , com origem no apoio, se propaga pela viga. Com a análise das distribuições de deformações e tensões no modelo numérico, observa-se que o mesmo consegue simular este modo de ruptura.

7 | CONCLUSÃO

O modelo numérico desenvolvido fornece resultados aproximados aos experimentais, embora a curva carga-deslocamento numérica tenha se mostrado um pouco mais rígida, o resultado da carga de ruína foi muito similar ao real, sendo verificado ainda um mesmo comportamento da armadura longitudinal de tração.

Como o modelo foi validado, é possível inferir que a curva carga-deformação encontrada para a armadura longitudinal à compressão descreve o comportamento correto do elemento, visto que no trabalho experimental foi verificado um erro para esta.

A simulação desenvolvida contribuiu para uma melhor compreensão do comportamento

da viga de concreto armado durante o processo de carga, sendo verificado como as tensões e deformações atuam na formação das fissuras.

Embora o estudo contemple apenas os pontos analisados no trabalho experimental, a simulação permite uma análise minuciosa de todos os seus pontos constituintes da viga, sendo possível realizar uma análise mais completa do processo de carregamento na estrutura.

Pode-se dizer que o objetivo principal deste trabalho foi atingindo, uma vez que o modelo numérico desenvolvido conseguiu representar o comportamento real da viga de concreto armado.

REFERÊNCIAS

- ABU AL-RUB, R. K.; KIM, S. M. **Computational applications of a coupled plasticity-damage constitutive model for simulating plain concrete fracture**. *Engineering Fracture Mechanics*, v. 77, n. 10, p. 1577–1603, 2010.
- ABU AL-RUB, R. K.; VOYIADJIS, G. Z. **Gradient-enhanced Coupled Plasticity-anisotropic Damage Model for Concrete Fracture**: Computational Aspects and Applications. *International Journal of Damage Mechanics*, v. 18, n. 2, p. 115–154, 2009.
- ALFARAH, B.; LÓPEZ-ALMANSA, F.; OLLER, S. **New methodology for calculating damage variables evolution in Plastic Damage Model for RC structures**. *Engineering Structures*, v. 132, n. January, p. 70–86, 2017.
- CORNELLISSEN, H.; HORDIJK, D.; REINHARDT, H. **Experimental determination of crack softening characteristics of normal weight and lightweight concrete**. *Heron*, v. 31, n. 2, p. 45–56, 1986.
- ELLOBODY, E.; YOUNG, B. **Performance of shear connection in composite beams with profiled steel sheeting**. *Journal of Constructional Steel Research*, v. 62, n. 7, p. 682–694, 85, 2006.
- GOMES, L. D. S. **Análise experimental da eficiência das fibras de aço no reforço ao cisalhamento de vigas em concreto armado**. 2016. 100f. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Belém, 2016.
- INTERNATIONAL FEDERATION STRUCTURAL CONCRETE. **fib-MC2010 (2012)**. The International Federation for Structural Concrete, *fib Model Code 2010 Final draft*. Volume 2, April 2012.
- LEE, J. H.; FENVES, G. L. **Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures**. *J. Eng. Mech. (ASCE)*, v. 124, n. 8, p. 892–900, 1998.
- LIMA, J. M. **Estudo da capacidade resistente do conector de cisalhamento treliçado via método dos elementos finitos**. 2018. 88f. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, 2018.
- LOPEZ-ALMANSA, F.; ALFARAH, B.; OLLER, S. Numerical simulation of RC frame testing with damaged plasticity model comparison with simplified models. **2nd European Conference on Earthquake Engineering and Seismology**, n. November 2015, p. 1–12, 2014.
- LUBLINER, J.; OLIVER, J.; OLLER, S.; OÑATE, E. **A plastic-damage model for concrete**. *International Journal of Solids and Structures*, v. 25, n. 3, p. 299–326, 1989.

LYRA, P. H. C. **Modelagem numérica de estruturas de concreto armado utilizando o programa Atena**. 2011. 124f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica, São Paulo, 2011.

MARTINS, C. H. **Consideração da não-linearidade física para as vigas de concreto armado, pelo procedimento refinado da NB1**. Acta Scientiarum Technology, v. 30, n. 1, p. 15-18, 2008.

NGUYEN, H. T.; KIM, S. E. **Finite element modeling of push-out tests for large stud shear connectors**. Journal of Constructional Steel Research, v. 65, n. 10–11, p. 1909–1920, 2009.

OLLER, S. (1988). **Un modelo de “daño continuo” para materiales-friccionales**. Trabajo para grado de Doctor, Escola Tècnica Superior D’Enginyers De Camins, Canals I Ports, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, p. 471.

PEREIRA JUNIOR, W. M. **Análise numérica de estruturas de concreto com fibras utilizando mecânica do dano**. 2014. 157f. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil, 2014.

QURESHI, J.; LAM, D.; YE, J. **Effect of shear connector spacing and layout on the shear connector capacity in composite beams**. Journal of Constructional Steel Research, v. 67, n. 4, p. 706–719, 2011.

ROJAS, N. R. **Análise computacional de vigas reforçadas ao cisalhamento com sistemas EB-FRP: efeitos das interação estribos-fibras**. 2017. 128f. Dissertação (mestrado) – Universidade de Brasília, Faculdade de tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, 2017.

SOBRE OS ORGANIZADORES

FRANCIELE BRAGA MACHADO TULLIO - Engenheira Civil (Universidade Estadual de Ponta Grossa - UEPG/2006), Especialista em Engenharia de Segurança do Trabalho (Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR/2009, Mestre em Ensino de Ciências e Tecnologia (Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR/2016). Trabalha como Engenheira Civil na administração pública, atuando na fiscalização e orçamento de obras públicas. Atua também como Perita Judicial em perícias de engenharia. E-mail para contato: francielebmachado@gmail.com

LUCIO MAURO BRAGA MACHADO - Bacharel em Informática (Universidade Estadual de Ponta Grossa – UEPG/1995), licenciado em Matemática para a Educação Básica (Faculdade Educacional da Lapa – FAEL/2017), Especialista em Desenvolvimento de Aplicações utilizando Tecnologias de Orientação a Objetos (Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR/ 2008). É coordenador do Curso Técnico em Informática no Colégio Sant’Ana de Ponta Grossa/PR onde atua também como professor desde 1992, também é professor na Faculdade Sant’Ana atuando nas áreas de Metodologia Científica, Metodologia da Pesquisa e Fundamentos da Pesquisa Científica e atua como coordenador dos Sistemas de Informação e do Núcleo de Trabalho de Conclusão de Curso da instituição. E-mail para contato: machado.lucio@gmail.com

ÍNDICE REMISSIVO

A

Agressividade Marinha 48, 50, 51, 56, 58, 59

Análise Geométrica 114

Análise Não Linear 113, 114, 115, 116, 121, 122, 123, 124, 125, 127, 134, 135, 137

Análise Numérica 138, 149, 151, 163, 294

Argamassa 13, 59, 90, 92, 93, 97, 193

B

BIM 178, 179, 180, 181, 182, 183, 184, 185, 186, 235, 236, 239, 242, 244, 245, 246, 247, 248, 249, 250

C

CC 23, 27, 28, 33, 65, 81, 93, 95, 109, 116, 120, 122, 140, 141, 142, 143, 154, 156, 160, 161, 162, 169, 187, 189, 190, 200, 201, 280, 288, 289, 290, 292

Cisalhamento 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 73, 74, 75, 76, 128, 134, 136, 146, 241, 292, 293, 294

Coeficiente γ_z , 15

Compósitos 62, 74, 90, 91, 92, 94, 95, 96, 98

Concreto 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 20, 22, 30, 31, 32, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 43, 44, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 86, 87, 88, 89, 103, 104, 105, 112, 113, 114, 115, 116, 117, 123, 124, 125, 127, 128, 129, 130, 131, 132, 133, 136, 137, 138, 139, 140, 144, 145, 149, 150, 151, 152, 153, 154, 155, 156, 157, 158, 162, 163, 164, 165, 166, 167, 168, 169, 172, 173, 177, 178, 187, 188, 189, 190, 191, 192, 193, 194, 195, 196, 197, 201, 202, 203, 204, 209, 215, 216, 217, 218, 219, 220, 221, 223, 224, 225, 226, 227, 228, 229, 231, 232, 233, 234, 235, 237, 239, 240, 250, 251, 252, 253, 254, 258, 260, 261, 262, 264, 266, 267, 268, 278, 279, 280, 281, 282, 284, 285, 286, 287, 288, 289, 290, 293, 294

Concreto Armado 15, 16, 17, 18, 20, 22, 30, 31, 32, 35, 47, 60, 61, 62, 64, 66, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 88, 112, 113, 115, 116, 117, 124, 125, 127, 128, 130, 132, 133, 137, 138, 139, 149, 150, 151, 152, 155, 162, 163, 164, 165, 166, 172, 173, 177, 178, 204, 209, 215, 216, 217, 218, 219, 225, 235, 239, 240, 252, 253, 260, 261, 262, 266, 267, 278, 279, 280, 293, 294

Curvatura 115, 164, 165, 166, 167, 168, 169, 170, 171, 175, 176, 177

D

Deslocamento 27, 96, 121, 147, 161, 187, 197, 206

E

Edifícios 15, 16, 17, 20, 30, 31, 32, 33, 35, 47, 113, 114, 116, 119, 124, 126, 127, 128, 129, 136, 137, 177, 183, 239, 240, 272, 274

Efeito 13, 24, 43, 50, 55, 58, 59, 105, 116, 149, 164, 165, 176, 183, 206, 214, 244, 266, 275

Elementos 15, 16, 17, 18, 19, 23, 30, 34, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 43, 44, 60, 77, 78, 84, 96, 101, 103, 114, 115, 116, 122, 125, 127, 130, 136, 137, 138, 139, 141, 142, 144, 146, 147, 148, 149, 150, 151, 152, 153, 154, 156, 157, 158, 162, 163, 179, 181, 182, 184, 187, 189, 190, 197, 199, 200, 202, 203, 205, 208, 209, 213, 215, 217, 219, 220, 222, 223, 230, 231, 233, 238, 239, 241, 242, 243, 254, 258, 261, 262, 266, 267, 278, 279, 280, 285, 287, 288, 289, 293

Engesser-Courbon 204, 205, 206, 207, 212, 213, 215

Estabilidade Global 15, 16, 17, 22, 30, 32, 33, 36, 43, 47, 99, 108, 109, 114, 115, 116

Estais 99, 100, 101, 102, 103, 105, 106, 107, 108, 109, 110, 112

Estocástico 187, 190, 191, 197, 198, 200, 201, 202

Estruturas 15, 16, 17, 18, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 47, 48, 49, 58, 60, 64, 74, 75, 76, 77, 79, 89, 97, 100, 101, 103, 112, 114, 115, 116, 117, 118, 123, 124, 127, 128, 136, 137, 145, 150, 151, 152, 162, 163, 165, 166, 177, 178, 180, 188, 190, 202, 203, 209, 215, 216, 230, 233, 234, 235, 236, 237, 239, 250, 251, 252, 253, 254, 255, 256, 258, 266, 267, 268, 272, 279, 294

F

Fibra 60, 61, 62, 63, 65, 74, 75, 76, 90, 91, 92, 93, 94, 97

Fibra de Sisal 90, 91, 92, 97

Fluência 77, 79, 81, 82, 86, 88, 166

Fogo 151, 152, 153, 157, 162

G

Gestão 3, 150, 178, 179, 183, 186, 269

L

Lajes 17, 18, 20, 21, 24, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 47, 75, 119, 125, 128, 130, 132, 133, 134, 136, 137, 138, 139, 144, 145, 147, 148, 149, 150, 151, 152, 155, 156, 158, 159, 160, 161, 162, 206, 207, 208, 209, 218, 220, 228, 243, 258, 260, 261, 262, 264, 265, 266

Lajes Nervuradas 32, 33, 34, 35, 41

M

Método 5, 9, 20, 29, 52, 62, 64, 67, 68, 69, 72, 79, 84, 104, 114, 116, 127, 130, 138, 139, 143, 144, 149, 150, 156, 164, 165, 166, 167, 168, 169, 171, 172, 173, 174, 175, 176, 177, 181, 187, 189, 190, 191, 197, 199, 200, 202, 203, 204, 205, 206, 207, 208, 209, 210, 212, 213, 214, 215,

216, 238, 239, 240, 249, 252, 279, 283, 287, 293

Método Geral 164, 165, 166, 168, 169, 171, 172, 173, 175, 176, 177

Minerais 2, 4, 13, 193

Modelos 21, 22, 24, 25, 26, 28, 29, 60, 61, 62, 63, 64, 66, 67, 68, 70, 73, 74, 75, 107, 115, 116, 138, 144, 145, 146, 149, 150, 151, 153, 155, 185, 188, 204, 209, 212, 213, 214, 215, 216, 220, 235, 239, 248, 278, 279, 280, 281, 285, 286

Módulo de Elasticidade 17, 77, 81, 86, 87, 88, 140, 166, 187, 188, 189, 190, 191, 192, 193, 194, 195, 196, 197, 198, 201, 202, 203, 282, 286

P

Parâmetro α 15, 25

Pavimento 1, 2, 3, 4, 13, 14, 21, 23, 27, 28, 38, 117, 118, 119, 130, 131, 132, 244, 261

Pilar de Concreto 164, 233

Placas 93, 96, 97, 138, 140, 144, 145, 146

Pontes 99, 100, 101, 103, 106, 107, 111, 112, 204, 205, 208, 209, 210, 213, 215, 216, 253, 258, 268

Potencial de Corrosão 48, 51, 52, 53, 57, 58

PRFC 60, 61, 62, 64, 65, 66, 67, 69, 73, 75, 76

Probabilidade 53, 187, 196, 197, 198, 235

Projetos 15, 100, 111, 120, 128, 138, 139, 178, 179, 180, 181, 182, 183, 184, 185, 186, 189, 217, 218, 220, 224, 226, 232, 233, 235, 238, 239, 240, 242, 243, 244, 245, 246, 249, 250, 258

R

Reforço 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 73, 74, 75, 76, 91, 92, 93, 95, 96, 97, 125, 129, 130, 131, 132, 134, 136, 234, 250, 258, 267, 293

Resíduos 1, 2, 3, 4, 11, 12, 13, 14

Resistência à Compressão 5, 48, 52, 54, 55, 56, 58, 59, 91, 103, 189, 192, 194, 217, 233, 282

Rigidez k 164, 165, 167, 171, 175, 176, 177

S

Sílica Ativa 48, 50, 51, 54, 55, 56, 58, 59, 92, 105

Simulação 48, 50, 51, 52, 56, 58, 59, 138, 155, 156, 157, 203, 278, 280, 281, 287, 288, 289, 290, 291, 292, 293

Sistemas 14, 15, 16, 17, 27, 32, 33, 37, 41, 44, 50, 75, 78, 88, 99, 143, 169, 178, 179, 180, 183, 184, 185, 197, 235, 237, 270, 272, 275, 276, 294, 295

Solução Analítica 77, 84

V

Vazios 7, 12, 48, 53, 56, 58, 59, 224, 227

Viga 42, 61, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 70, 73, 103, 187, 188, 189, 190, 191, 197, 198, 200, 201, 202, 203, 206, 208, 213, 214, 222, 223, 224, 225, 226, 227, 228, 233, 241, 245, 248, 263, 264, 266, 278, 280, 285, 287, 288, 289, 290, 291, 292, 293

 **Atena**
Editora

2 0 2 0