



As Engenharias frente a Sociedade, a Economia e o Meio Ambiente 3

Henrique Ajuz Holzmann
(Organizador)

Henrique Ajuz Holzmann
(Organizador)

As Engenharias frente a Sociedade, a
Economia e o Meio Ambiente 3

Atena Editora
2019

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

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

Conselho Editorial

Ciências Humanas e Sociais Aplicadas

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

Ciências Agrárias e Multidisciplinar

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

Ciências Biológicas e da Saúde

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

Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Profª Drª Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão
Profª Drª Vanessa Lima Gonçalves – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande

Ciências Exatas e da Terra e Engenharias

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista

Conselho Técnico Científico

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

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)	
E57	As engenharias frente a sociedade, a economia e o meio ambiente 3 [recurso eletrônico] / Organizador Henrique Ajuz Holzmann. – Ponta Grossa (PR): Atena Editora, 2019. – (As Engenharias Frente a Sociedade, a Economia e o Meio Ambiente; v. 3) Formato: PDF Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader Modo de acesso: World Wide Web Inclui bibliografia ISBN 978-85-7247-432-0 DOI 10.22533/at.ed.320192506 1. Engenharia – Aspectos sociais. 2. Engenharia – Aspectos econômicos. 3. Desenvolvimento sustentável. I. Holzmann, Henrique Ajuz. II. Série. CDD 658.5
Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422	

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

APRESENTAÇÃO

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

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

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

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

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

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

Boa leitura

Henrique Ajuz Holzmann

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	1
ANÁLISE DE PROPRIEDADES MECÂNICAS DE COMPÓSITOS CERÂMICOS DE ALUMINA-ZIRCÔNIA PARA APLICAÇÃO COMO FERRAMENTAS DE CORTE	
Miguel Adriano Inácio Maria do Carmo de Andrade Nono José Vitor Cândido de Souza Sergio Luiz Mineiro Daniel Alessandro Nono	
DOI 10.22533/at.ed.3201925061	
CAPÍTULO 2	10
SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE MODELO ELASTOPLÁSTICO EM ROCHA CARBONÁTICA CARSTIFICADA	
Rayane Conceição Ribeiro da Silveira Mattos Daniel Araújo Farias de Melo Marinésio Pinheiro de Lima Tiago de Freitas Viana Igor Fernandes Gomes Leonardo José do Nascimento Guimarães	
DOI 10.22533/at.ed.3201925062	
CAPÍTULO 3	26
A INFLUÊNCIA DO NITROGÊNIO EM AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS COM APLICAÇÃO EM PRÓTESES ORTOPÉDICAS	
Glauber Rodrigues Cerqueira de Cerqueira Pedro Eliézer de Araújo Júnior	
DOI 10.22533/at.ed.3201925063	
CAPÍTULO 4	42
MICROPOROUS ACTIVATED CARBON FIBER FELT FROM BRAZILIAN TEXTILE PAN FIBER: PREPARATION, CHARACTERIZATION AND APPLICATION AS SUPERCAPACITOR ELECTRODE	
Jossano Saldanha Marcuzzo Aline Castilho Rodrigues Andres Cuña Nestor Tancredi Eduardo Mendez Heide Heloise Bernardi Mauricio Ribeiro Baldan	
DOI 10.22533/at.ed.3201925064	
CAPÍTULO 5	55
ANÁLISE COMPARADA DE UM AGREGADO DE ESCÓRIA DE ACIARIA COMO MATERIAL ALTERNATIVO PARA LASTRO DE VIAS FÉRREAS DO TIPO <i>HEAVY HAUL</i> POR MEIO DE ENSAIOS TRIAXIAIS	
Bruno Guimarães Delgado Antônio Viana da Fonseca Eduardo Fortunato Daniela Raquel Ferreira Coelho	
DOI 10.22533/at.ed.3201925065	

CAPÍTULO 6	71
CARACTERIZAÇÃO EM FADIGA POR FLEXÃO ROTATIVA DE FIOS DE ARAME DE SOLDA	
Ingrid Ariani Belineli Barbosa	
Heide Heloise Bernardi	
William Marcos Muniz Menezes	
DOI 10.22533/at.ed.3201925066	
CAPÍTULO 7	80
ESTUDO DA MICROESTRUTURA NA ZONA TERMICAMENTE AFETADA COM A VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM	
Luís Henrique Pires da Silva	
Alex Sander Chaves da Silva	
DOI 10.22533/at.ed.3201925067	
CAPÍTULO 8	92
ESTUDO DA USINAGEM DA SUPERLIGA A BASE DE FERRO-NÍQUEL UTILIZANDO FERRAMENTA CERÂMICA	
Eduardo Pires Bonhin	
Sarah David Müzel	
Marcel Yuzo Kondo	
Lúcia de Almeida Ribeiro	
José Vitor Candido de Souza	
Marcos Valério Ribeiro	
DOI 10.22533/at.ed.3201925068	
CAPÍTULO 9	100
CONSTRUÇÃO DE UMA MÁQUINA DE NÉVOA SALINA ATENDENDO AOS REQUISITOS MÍNIMOS CONTIDOS NAS NORMAS ISO 9227 e ASTM B-117	
Leonardo de Souza Coutinho	
Alexandre Alvarenga Palmeira	
DOI 10.22533/at.ed.3201925069	
CAPÍTULO 10	111
MECANIZAÇÃO AGRÍCOLA: COLHEITADEIRAS AXIAIS X RADIAIS	
Filipi José Arantes Lemos	
João Mario Mendes de Freitas	
DOI 10.22533/at.ed.32019250610	
CAPÍTULO 11	127
MÉTODO DE OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA PARA O PROJETO DE MODELOS DE BIELAS E TIRANTES	
Jamile Maria Araujo Tavares	
Rejane Martins Fernandes Canha	
DOI 10.22533/at.ed.32019250611	
CAPÍTULO 12	142
ESTUDO NUMÉRICO DE UM EQUIPAMENTO DE SECAGEM	
Eduardo Dal Piva Schuch	
Magaiver Gabriel Lamp	
Conrado Mendes Morais	
Ângela Beatrice Dewes Moura	
DOI 10.22533/at.ed.32019250612	

CAPÍTULO 13	153
SISTEMA DE AQUECIMENTO DE ÁGUA A COMBUSTÃO DE GASOLINA	
Felipe Michael Grein	
Jean Lucas Pereira	
Luiz Felipe Weck	
Olaf Graupmann	
DOI 10.22533/at.ed.32019250613	
CAPÍTULO 14	156
MODELAGEM DE PID PARA SISTEMA DE CONTROLE DE RAMPAS DE TEMPERATURA EM BRASSAGEM	
Gabriel Queiroz	
Marcelo Barros de Almeida	
Márcio Jose da Cunha	
DOI 10.22533/at.ed.32019250614	
CAPÍTULO 15	168
MODELAGEM MATEMÁTICA DE SISTEMAS DINÂMICOS: UMA ABORDAGEM DIDÁTICA	
Lucas Divino Alves	
Neylor Makalister Ribeiro Vieira	
Emerson Paulino dos Reis	
DOI 10.22533/at.ed.32019250615	
CAPÍTULO 16	183
APLICAÇÃO E ANÁLISE VIA MEC EM PROBLEMAS DE TERMOELASTICIDADE 2D	
Luis Vinicius Pereira Silva	
Gilberto Gomes	
João Carlos Barleta Uchôa	
DOI 10.22533/at.ed.32019250616	
CAPÍTULO 17	198
SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA INJEÇÃO DE ÁGUA EM RESERVATÓRIO DE PETRÓLEO HETEROGÊNIO	
Raquel Oliveira Lima	
José Arthur Oliveira Santos	
Antônio Jorge Vasconcellos Garcia	
Felipe Barreiros Gomes	
DOI 10.22533/at.ed.32019250617	
CAPÍTULO 18	207
TANQUES FLASH: DIMENSIONAMENTO E ANÁLISE DE CUSTOS NO SOFTWARE DE MODELAGEM E SIMULAÇÃO EMSO	
Erich Potrich	
Sérgio Correia da Silva	
Larissa Souza Amaral	
DOI 10.22533/at.ed.32019250618	

CAPÍTULO 19	215
AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE DEPOSIÇÃO ORGÂNICA EM OPERAÇÕES DE MISTURA DE PETRÓLEOS NO TANQUE DE ESTOCAGEM EM REFINARIAS DE PETRÓLEO	
Rosberguer de Almeida Camargo	
Mauren Costa da Silva	
Rafael Beltrame	
Darci Alberto Gatto	
Antônio Carlos da Silva Ramos	
DOI 10.22533/at.ed.32019250619	
CAPÍTULO 20	223
AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA EMBARCADO PARA MENSURAR A ILUMINÂNCIA EM UM AVIÁRIO EXPERIMENTAL	
Giovanni Polette Dalla Libera	
Victor Moreira Leão	
Vitor Augusto de Sousa	
Matheus Fernando Lima Zuccherelli de Souza	
Renata Lima Zuccherelli de Oliveira	
Marcelo Eduardo de Oliveira	
Adriano Rogério Bruno Tech	
DOI 10.22533/at.ed.32019250620	
CAPÍTULO 21	230
CONTROLADOR FUZZY SINTONIZADO POR ALGORITMO GENÉTICO EM SISTEMA DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA	
Lenon Diniz Seixas	
Diego Solak Castanho	
Hugo Valadares Siqueira	
Fernanda Cristina Corrêa	
DOI 10.22533/at.ed.32019250621	
CAPÍTULO 22	243
CONTROLADORES ROBUSTO APLICADO A CONVERSORES CC-CC	
Luiz Otávio Limurci dos Santos	
Luiz Antonio Maccari Junior	
DOI 10.22533/at.ed.32019250622	
CAPÍTULO 23	261
PROPOSTA DE PLATAFORMA PARA ESTUDO DE MOTOR A RELUTÂNCIA VARIÁVEL 8/6	
Marcos José de Moraes Filho	
Luciano Coutinho Gomes	
Darizon Alves de Andrade	
Josemar Alves dos Santos Junior	
Wanberton Gabriel de Souza	
Cássio Alves de Oliveira	
DOI 10.22533/at.ed.32019250623	

CAPÍTULO 24	275
ESTUDO COMPARATIVO DE MODELAGENS DE ENROLAMENTOS DE UM TRANSFORMADOR UTILIZANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS PARA ANÁLISES DE ESFORÇOS ELETROME CÂNICOS	
Pedro Henrique Aquino Barra Arnaldo José Pereira Rosentino Junior Antônio Carlos Delaiba	
DOI 10.22533/at.ed.32019250624	
CAPÍTULO 25	287
PROCEDIMENTO PARA AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DO LAÇO DE HISTERESE MAGNÉTICA	
Vitor Hörbe Pereira Da Costa Antônio Flavio Licarião Nogueira Leonardo José Amador Salas Maldonado	
DOI 10.22533/at.ed.32019250625	
CAPÍTULO 26	294
SIMULAÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO DE CAMPO E CORRENTE ELÉTRICA EM TECIDOS BIOLÓGICOS	
Guilherme Brasil Pintarelli Afrânio de Castro Antonio Jr. Raul Guedert Sandra Cossul Daniela Ota Hisayasu Suzuki	
DOI 10.22533/at.ed.32019250626	
CAPÍTULO 27	307
SISTEMA DE PRESENÇA UTILIZANDO IDENTIFICAÇÃO POR RADIOFREQUÊNCIA	
Giovani Formaggio Mateus Ricardo Barroso Leite	
DOI 10.22533/at.ed.32019250627	
CAPÍTULO 28	322
SISTEMAS DEFASADORES EM ALTA FREQUÊNCIA UTILIZANDO MICROFITA EM SUBSTRATO FR4	
Jobson De Araújo Nascimento José Moraes Gurgel Neto Alexsandro Aleixo Pereira da Silva Regina Maria de Lima Neta	
DOI 10.22533/at.ed.32019250628	
CAPÍTULO 29	333
ANÁLISES DA RUPTURA EM TRECHO DA BR-060 NO MUNICÍPIO DE ALEXÂNIA, GOIÁS, E CONDIÇÕES APÓS SEIS ANOS DA RECUPERAÇÃO	
Rideci Farias Tiago Matias Lino Haroldo da Silva Paranhos Itamar de Souza Bezerra Ranieri Araújo Farias Dias Alexsandra Maiberg Hausser	
DOI 10.22533/at.ed.32019250629	
SOBRE O ORGANIZADOR	346

MÉTODO DE OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA PARA O PROJETO DE MODELOS DE BIELAS E TIRANTES

Jamile Maria Araujo Tavares

Universidade Federal de Sergipe

São Cristóvão - SE

Rejane Martins Fernandes Canha

Universidade Federal de Sergipe

São Cristóvão - SE

RESUMO: A segurança das estruturas e a qualidade das construções dependem do método de dimensionamento utilizado pelo projetista. Para as regiões com descontinuidades geométricas e/ou estáticas (regiões D), o Modelo de Bielas e Tirantes apresenta-se como uma ferramenta para o dimensionamento e detalhamento dessas regiões. Entretanto, ainda não existe um consenso nas normas de estruturas de concreto e as informações são incompletas em algumas delas, como a definição da resistência e dimensões das bielas e dos nós em algumas peças. O Modelo de Bielas e Tirantes que partiu do modelo de treliças de Ritter e Mörsch, através dos trabalhos de Schäfer e Schlaich, fornece a possibilidade de dimensionar estruturas sem o empirismo que por vezes é utilizado devido a inexperiência do projetista e a falta de resultados experimentais. Já a Otimização Topológica é utilizada para se obter um modelo de bielas e tirantes eficiente na construção e economicamente viável. Assim, foi realizada uma modelagem numérica

utilizando o Método de Otimização Topológica para a obtenção de Modelos de Bielas e Tirantes viáveis para efeitos de projeto.

PALAVRAS-CHAVE: Otimização Topológica; Elementos Finitos; Bielas e Tirantes; Concreto Armado.

ABSTRACT: The safety of structures and the quality of constructions depends on the sizing method used by the designer. For regions with geometric discontinuities and/or static (D regions), the Strut and Tie Model is a tool for sizing and detailing these regions. However, there is still no consensus on the norms of concrete structures and information is incomplete in some of them, such as the definition of resistance and dimensions of the connecting rods and knots in some parts. The Strut and Tie Model, which started from the truss model of Ritter and Mörsch, through the works of Schäfer and Schlaich, provides the possibility of sizing structures without the empiricism that is sometimes used due to the inexperience of the designer and the lack of experimental results. The Topological Optimization is used to obtain a strut and tie model that is efficient in construction and economically feasible. Thus, a numerical modeling was performed using the Topological Optimization Method to obtain feasible Strut and Tie Models for design purposes.

KEYWORDS: Topological Optimization; Finite

1 | INTRODUÇÃO

As estruturas podem ser divididas em regiões B, o termo vem de “Beam”, onde a teoria das vigas é aplicada e em regiões D, “Discontinuous”, que são locais de descontinuidade onde a mesma teoria não é aplicada apesar de ambas as regiões serem adjacentes (WIGHT e MACGREGOR, 2012).

As regiões podem ser descontínuas devido a descontinuidades geométricas, proximidades com furos, mudanças abruptas na seção e direção, ou por descontinuidades estáticas como a aplicação de cargas concentradas, reações e presença de articulações. Essas regiões eram dimensionadas pelo conhecimento empírico e pelas “boas práticas”, até os estudos de Schlaich (WIGHT e MACGREGOR, 2012). A Figura 1 apresenta essas regiões.

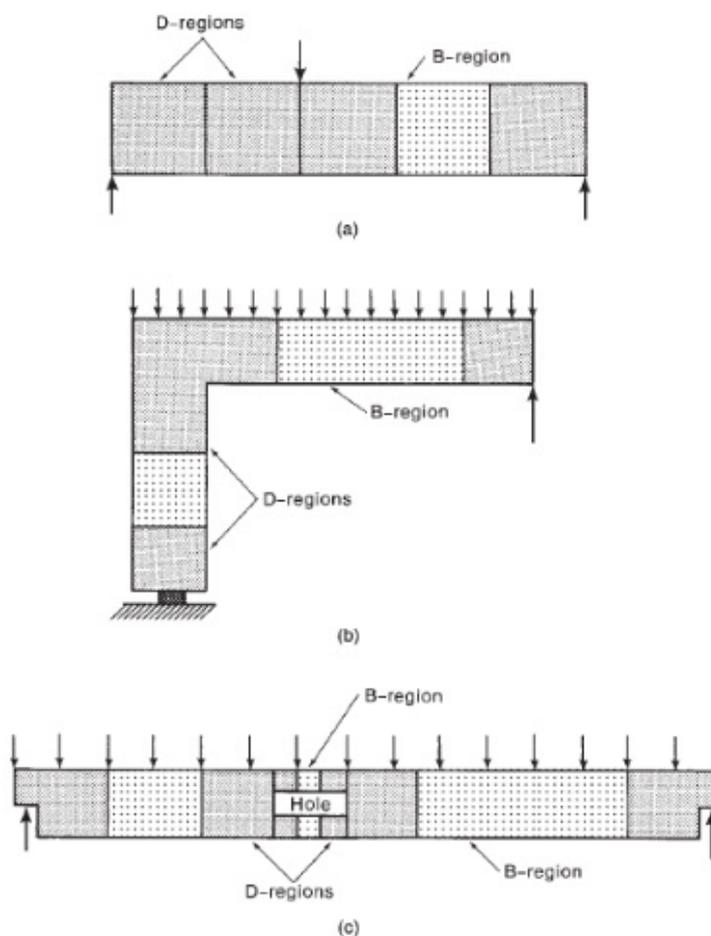


Figura 1. Regiões-B e regiões-D

Fonte: (Wight e MacGregor, 2012)

Na engenharia os problemas de difíceis soluções, como os das regiões D, podem ser resolvidos através do Método dos Elementos Finitos (MEF). Esse método consiste basicamente em substituir um problema difícil por diversos problemas

menores, que podem ser resolvidos para então obter uma resolução aproximada de tal. Cada elemento de pequena dimensão na qual o problema inicial foi discretizado é denominado de Elemento Finito. Esses elementos estão interconectados por nós onde é possível obter soluções aproximadas e onde as equações de equilíbrio podem ser estabelecidas. Dentro do elemento finito são feitas interpolações por funções simples, que possibilitam resultados aproximados a partir das soluções dos nós que contornam cada elemento (Souza, 2004).

Algumas Normas estrangeiras recomendam o MEF para a análise das estruturas, são exemplos o CEB-FIP Model Code (1993), nos seus itens 5.5, 5.6 e 5.7, a norma canadense CSA (1994), EUROCODE 2 (1999), a norma espanhola EHE (1999) de modo implícito. Enquanto a norma brasileira NBR 6118 (2003) recomenda o MEF de modo explícito para elementos especiais do tipo paredes com furo na alma, e de modo implícito para consoles, dentes gerber e vigas-parede, mas não fornece meios para o desenvolvimento de projetos com o uso da metodologia (Souza, 2004).

Atualmente a norma brasileira NBR 6118 (2014) no seu item 14 - Análise estrutural, recomenda que a análise estrutural linear ou não-linear seja realizada por algum método numérico como os métodos das diferenças finitas, elementos finitos ou elementos de contorno. O mesmo acontece no item 22 – Elementos especiais, onde a norma aborda brevemente o Método de Bielas e Tirantes e recomenda o uso do Método dos Elementos Finitos para o cálculo de vigas paredes.

Ainda de acordo com Souza (2004), para a análise de estruturas de concreto, o MEF pode ser visto como um rival do Método das Bielas e Tirantes, porém são as análises elásticas do MEF que possibilitam o encaminhamento das forças no interior da estrutura para a construção dos modelos de bielas e tirantes sem empirismo.

O Modelo das Bielas e Tirantes partiu da analogia da treliça de Ritter e Mörsch. Nesse modelo admite-se que os tirantes estejam escoados antes do concreto chegar a ruptura, por isso é fundamentado no Teorema do Limite Inferior da Teoria da Plasticidade (Souza, 2004).

Foi com os trabalhos de Schäfer e Schlaich que o Modelo das Bielas ganhou impulso, segundo Souza (2004). Eles propuseram simplificações para a resistência das escoras e das regiões nodais, de modo que critérios para o dimensionamento de estruturas de concreto com descontinuidades estáticas ou geométricas puderam ser possíveis.

Para esse modelo, as bielas são os elementos comprimidos do concreto enquanto os tirantes são os elementos tracionados que possuem armaduras localizadas na direção da sua tração. Eventualmente, podem surgir tirantes no concreto para possibilitar o equilíbrio nos nós do modelo. A determinação das tensões é realizada através de fluxos no processo do caminho de carga (Silva, 1991).

Ainda de acordo com Silva (1991), a geometria do modelo depende dos tipos de ações atuantes, ângulos entre bielas e tirantes, área de aplicação das ações e reações, número de camadas da armadura e cobrimento da armadura.

Na aplicação do modelo são definidas as regiões B e D. As regiões contínuas onde as hipóteses de Bernoulli são válidas são chamadas de “B”, enquanto as descontínuas onde as hipóteses de Bernoulli não são válidas de “D”. Nas regiões D a distribuição de tensões é não-linear e são produzidas por descontinuidades estáticas e/ou geométrica, nelas o fluxo interno de tensões é representado pelo modelo de bielas e tirantes (Silva, 1991).

Em projetos deve-se primeiramente, realizar a análise estrutural para dividir a estrutura em regiões B e D. As regiões B podem ser projetadas por modelos de treliça e as regiões D a partir dos esforços solicitantes no seu contorno. Os modelos são geralmente bidimensionais, para isso pode-se subdividir as estruturas em seus planos individuais (Silva, 1991).

O fluxo de cargas, através do processo do caminho de carga, sistematiza o modelo de bielas e tirantes. A região a ser modelada deve estar em equilíbrio externo, caso haja ação distribuída esta deve ser substituída por forças equivalentes concentradas, o caminho de carga é construído entre a ligação das cargas externas com as reações e são feitos pelo menor percurso possível sem se interceptarem. Em seguida o caminho de carga deve ser substituído por linhas de um polígono, essas linhas serão as bielas e os tirantes, também são adicionadas linhas para equilibrar os nós (Silva, 1991). A Figura 2 apresenta essas etapas do modelo.

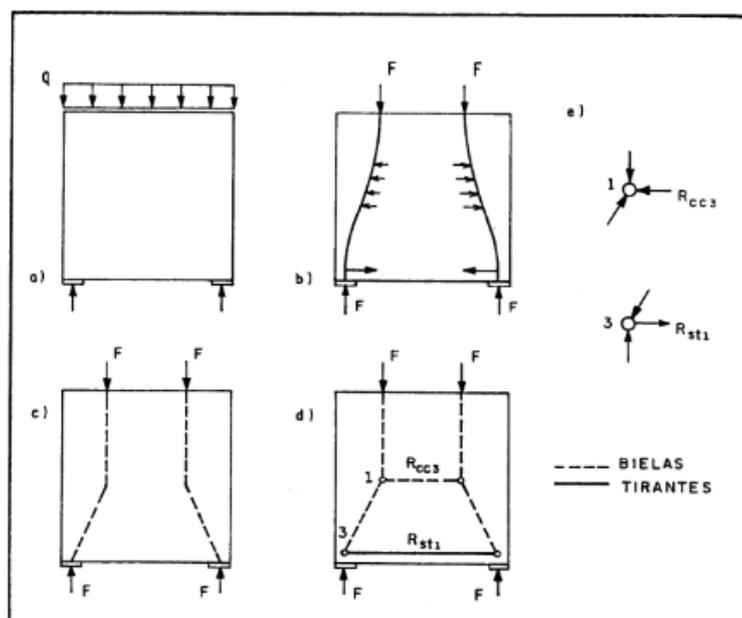


Figura 2. Aplicação do processo de caminho de carga

Fonte: (Silva, 1991)

Apesar da atual aceitação do Modelo de Bielas e Tirantes, existem problemas que impedem sua aplicação e automatização. Problemas como a influência do projetista estrutural para tornar o modelo aplicável, a dificuldade de avaliar se uma topologia representa o fluxo de tensões de modo realista e de qualificar o desempenho de cada

modelo possível, podem ser resolvidos através da Otimização Topológica (Pantoja et al., 2010).

Segundo Souza (2004), a otimização topológica ainda é pouco difundida na engenharia civil e na engenharia estrutural o seu uso ainda está no início. A otimização topológica produz treliças, logo é natural que se pense em representá-la no modelo de bielas e tirantes. Para obter esse modelo o material da estrutura a ser otimizada é distribuído de modo que leve a obtenção da máxima rigidez.

Um inconveniente que pode ocorrer ao obter a otimização pela máxima rigidez é que as armaduras são dispostas aleatoriamente o que dificulta a sua aplicação em obras. Mas esse problema pode ser resolvido com o emprego do uso de um padrão discreto na forma de reticulado (Souza, 2004).

Uma das alternativas para a otimização topológica é o modelo de elasticidade plana com otimização evolutiva, consiste em realizar sucessivas análises elásticas através do MEF, a cada iteração os elementos menos carregados são eliminados a partir de uma comparação entre a máxima tensão de Von Mises e a tensão atuante no elemento, a iteração segue até que todos os elementos superem o critério. O fundamento desse modelo está na eliminação das zonas com menores tensões, logo menos aproveitadas, até que a estrutura esteja em um estado ótimo (Souza, 2004).

De acordo com Bendsøe e Sigmund (2003), a otimização topológica tem por objetivo encontrar um layout ótimo para uma estrutura dentro de uma região especificada. Para isso são conhecidas as cargas aplicadas, as condições de apoio, o volume e possíveis restrições na geometria como vazios, seu tamanho e localização. A estrutura é definida por funções com parâmetros que representam a matriz de rigidez do contínuo, então para alcançar o layout ótimo são escolhidos parâmetros adequados.

Ainda em Bendsøe e Sigmund (2003), é apresentado como determinar um desenho na sua forma ideal, isso é feito a partir de um problema de distribuição de material no desenho. Seja um elemento mecânico cujo domínio é Ω_{mat} , pertencente ao domínio maior Ω em R^2 ou R^3 , em que Ω é o domínio de referência também chamado de *ground structure* onde as cargas aplicadas ao corpo e suas condições de contorno são definidas. Sobre Ω é definido o problema ótimo como um problema de encontrar a escolha ideal do tensor de rigidez, uma variável sobre o domínio.

2 | OBJETIVOS

- Ampliar os conhecimentos referentes aos métodos de análise estrutural das regiões D, como o Método dos Elementos Finitos (MEF), o Modelo de Bielas e Tirantes (MBT), e o mais recente, o Método de Otimização Topológica (MOT);
- Desenvolver e Implementar a Otimização Topológica de Modelos de Bielas e Tirantes das regiões D;
- Comparar os resultados de Otimização Topológica com os obtidos pelo tra-

dicional Modelo de Bielas e Tirantes para algumas regiões D selecionadas, possibilitando também o refinamento dos modelos de treliça já existentes. Nesse sentido, pretende-se propor uma modernização para os tradicionais Modelos de Bielas e Tirantes.

3 | METODOLOGIA

Para o presente artigo, foram feitas modelagens numéricas utilizando o Método de Otimização Topológica com a formulação em que o domínio a ser otimizado é discretizado por uma malha de barras interconectadas, o que na literatura internacional é chamado de Método do *Ground Structure*. O programa utilizado foi desenvolvido em linguagem MATLAB por Sanders et al. (2017), e adaptado para considerar o custo nodal (L_n), que está relacionado com um volume fictício para os nós que permite simplificar a topologia final da estrutura.

4 | FORMULAÇÃO DA OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA UTILIZADA

A formulação de Otimização Topológica utilizada foi a desenvolvida por Sanders et al. (2017). Essa formulação utiliza o Método do *Ground Structure*, com a aplicação de um filtro máximo para garantir o equilíbrio da estrutura treliçada otimizada. A restrição utilizada foi a de volume, onde o volume da estrutura otimizada deve atender a um volume prescrito inicial. Na Eq. (1), está a formulação que anula as barras quando a fração da sua área em relação a área máxima é inferior ao valor do filtro durante o processo de otimização (Sanders et al., 2017).

$$x_i = \text{Filtro}(x, \alpha_f) = \begin{cases} 0, & \text{se } \frac{x_i}{\max(x)} < \alpha_f \\ x_i, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (1)$$

Onde as áreas das barras da treliça são denominadas de x e α_f é o valor do filtro. A formulação com a otimização imposta está disposta na Eq. (2).

$$\begin{aligned} & \text{mín}_x C(x) = F^T u(x) \\ \text{tal que } & L^T x \leq V^{\text{máx}} \\ & 0 \leq x_i \leq x_i^{\text{máx}} \\ \text{com } & x_i = \text{Filtro}(x, \alpha_f) \\ \text{e } & \text{mín}_u \prod (u(x)) + \frac{\lambda}{2} u(x)^T u(x) \end{aligned} \quad (2)$$

Onde a função objetivo C é o trabalho das forças externas (F), u são os

deslocamentos nodais, L é o comprimento das barras, $V^{\text{máx}}$ é o volume máximo após a otimização do volume total, $x^{\text{máx}}$ é a área máxima da seção transversal das barras e $\prod(u(x))$ é a energia potencial (Sanders et al., 2017).

Utilizou-se o algoritmo para o filtro máximo desenvolvido por Sanders et al. (2017):

Iniciar:

Filtre o limite inferior, $\alpha_f^- = 0,0$

Filtre o limite superior, $\alpha_f^+ = 1,0$

Valor do filtro atual, $\alpha_f = (\alpha_f^- + \alpha_f^+) / 2$

Valor do filtro equilibrado, $\alpha_f^{eq} = 0,0$

Mudança de valor no filtro equilibrado, $\Delta\alpha_f^{eq} = 1,0$

Aplicar o filtro atual: $x_i = \text{Filtro}(x, \alpha_f)$

Enquanto $\Delta\alpha_f^{eq} > 1 \times 10^{-4}$, faça

Se $R \leq \rho$ e $\Delta C < C_{tol}$, então

Calcule a mudança no valor do filtro de equilíbrio:

$$\Delta\alpha_f^{eq} = |\alpha_f^{eq} - \alpha_f|$$

Armazene o valor do filtro de equilíbrio: $\alpha_f^{eq} = \alpha_f$

Redefina o limite do filtro inferior: $\alpha_f^- = \alpha_f$

Aumente o valor do filtro atual: $\alpha_f = (\alpha_f^- + \alpha_f^+) / 2$

Senão

Redefina o limite do filtro superior: $\alpha_f^+ = \alpha_f$

Diminua o valor do filtro atual: $\alpha_f = (\alpha_f^- + \alpha_f^+) / 2$

Fim se

Aplicar o filtro atual: $x_i = \text{Filtro}(x, \alpha_f)$

Fim enquanto

5 | RESULTADOS

Foram modeladas estruturas que apresentavam regiões D, para comparar esses modelos de bielas e tirantes que foram gerados a partir do Método dos Elementos Finitos e da otimização topológica com os modelos tradicionais de bielas e tirantes encontrados na literatura.

Esses modelos tradicionais são realizados a partir da experiência do projetista e de resultados obtidos em ensaios sem qualquer análise numérica, como por exemplo o Método dos Elementos Finitos que foi empregado na malha utilizada nas modelagens.

5.1 Processo de Otimização

No programa estudado foi criado o domínio de uma viga parede hiperestática, 3 apoios com 4 restrições, e duas cargas pontuais para comparação do processo

interativo para a mesma estrutura apresentada pela Federação Internacional de Concreto - Fédération Internationale du Béton (FIB). A Figura 3 foi apresentada pela FIB.

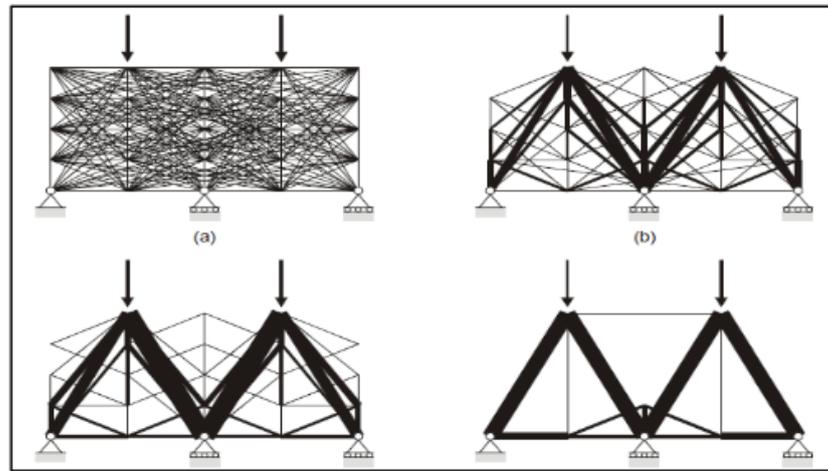


Figura 3. Viga 3 apoios e 2 cargas concentradas - Processo de otimização.

Fonte: (FIB, 2008)

A Figura 4 demonstra o processo de otimização realizado pelos programas estudados, desde a criação da malha treliçada, conhecida como *ground structure*, com o máximo grau de conectividade entre os elementos até a topologia final.

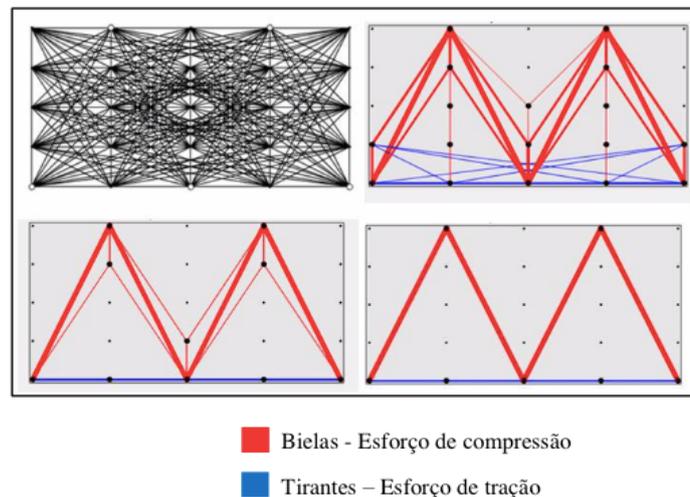


Figura 4. Processo de Otimização

Fonte: (Autores, 2018)

5.2 Modelos de Bielas e Tirantes com uso da Otimização Topológica

Para comparação dos modelos gerados com a otimização topológica foram utilizados os resultados de Kuchma et al. (2008) onde há três estruturas com regiões D que foram experimentadas e validadas pelo tradicional modelo de bielas e tirantes. Para cada um desses modelos são apresentadas quatro modelagens com a consideração

do custo nodal, representado pelo parâmetro (L_n), variado de modo que se obtivesse diferentes modelos para uma mesma estrutura. A restrição de volume das estruturas foi de 20%.

5.2.1 Viga L

A Figura 5 ilustra a primeira estrutura representa uma viga bi apoiada em formato de L com carregamento pontual e um vazio, caracterizando uma região D.

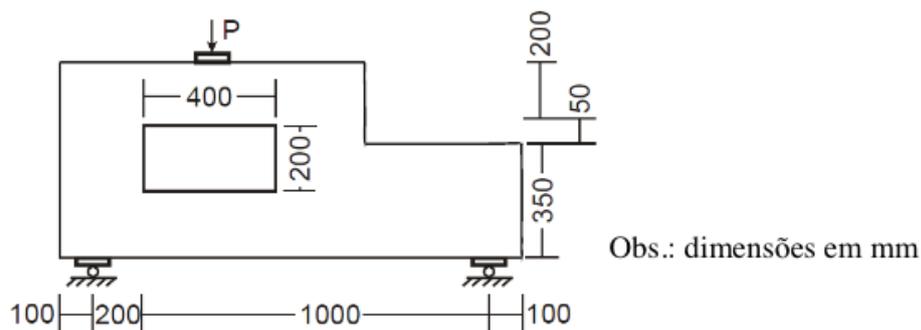


Figura 5. Viga L

Fonte: (Kuchma, 2008)

Na Figura 6, são apresentados os modelos de bielas e tirantes fornecidos por Kuchma (2008) para essa estrutura.

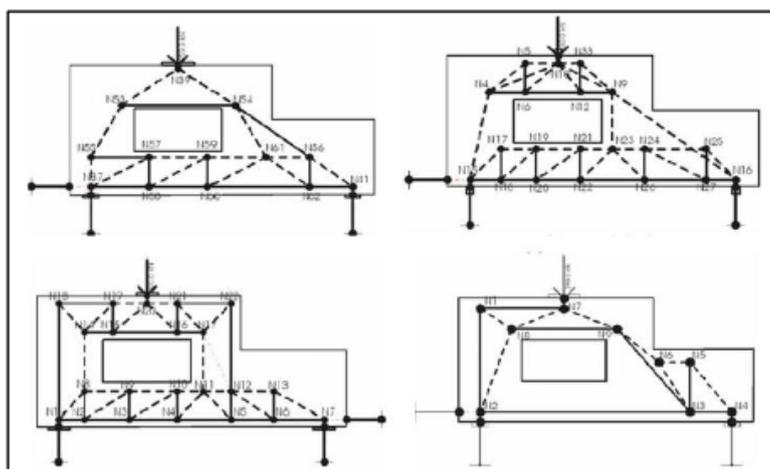


Figura 6. Modelos - Viga L

Fonte: (Kuchma, 2008)

O domínio dessa estrutura com os elementos de base é ilustrado na Figura 7 e na Figura 8 é apresentada a malha treliçada, conhecida como *Ground Structure*, essa malha foi construída no modo *full* onde todos os elementos da malha de base estão conectados.

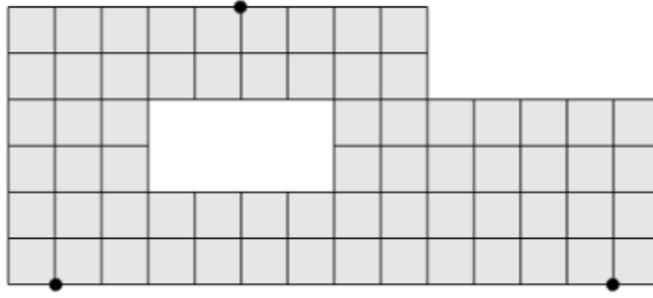


Figura 7. Malha de base para a malha treliçada (*Ground Structure*) - Viga L

Fonte: (Autores, 2018)

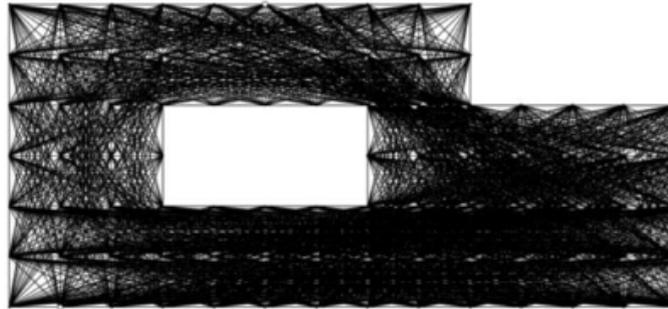


Figura 8: Malha treliçada (*Ground Structure*) - Viga L

Fonte: (Autores, 2018)

As modelagens realizadas para essa estrutura com a variação do custo nodal são apresentadas na Figura 9.

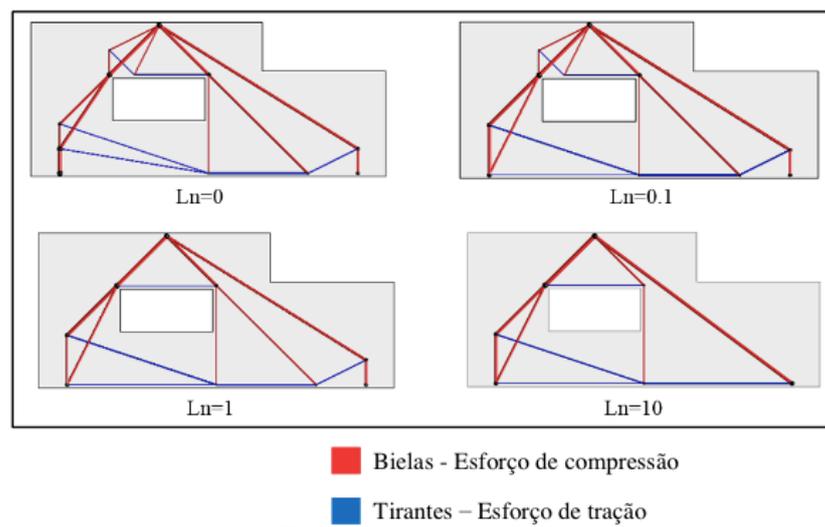


Figura 9. Topologia final - Viga L

Fonte: (Autores, 2018)

5.2.2 Viga engastada com vazio

Na Figura 10 é exposta mais uma estrutura semelhante a primeira e fornecida

por Kuchma et al. (2008), mas diferente pelo apoio engastado a direita. Na Figura 11 encontram-se seus modelos de bielas e tirantes apresentados em Kuchma et al. (2008).

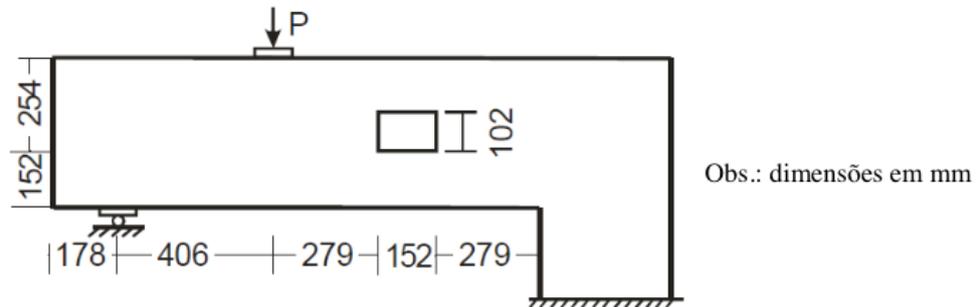


Figura 10. Viga engastada com vazio

Fonte: (Kuchma, 2008)

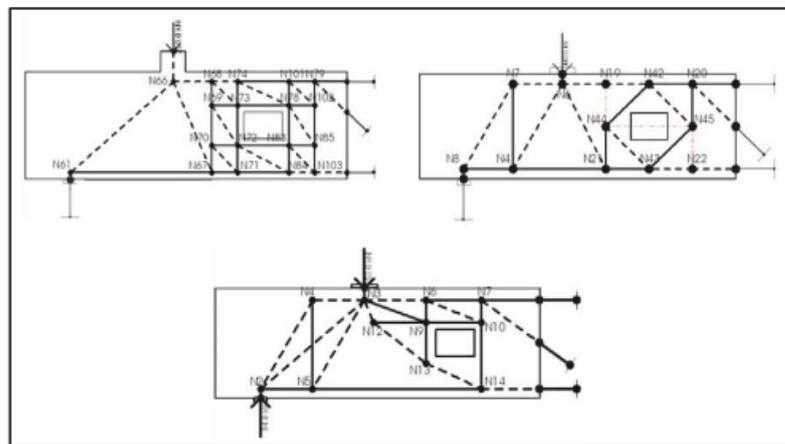


Figura 11. Modelos - Viga engastada com vazio

Fonte: (Kuchma, 2008)

Na Figura 12, ilustra-se o domínio dessa estrutura e os elementos de base para a geração da estrutura do *Ground Structure* apresentada na Figura 13. Na Figura 14, são apresentados os resultados obtidos com a variação do custo nodal.

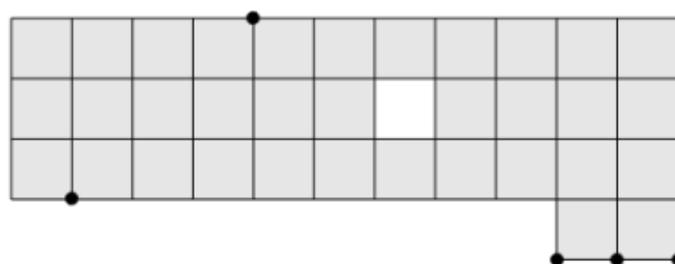


Figura 12. Malha de base para a malha treliçada (*Ground Structure*) - Viga engastada com vazio

Fonte: (Autores, 2018)

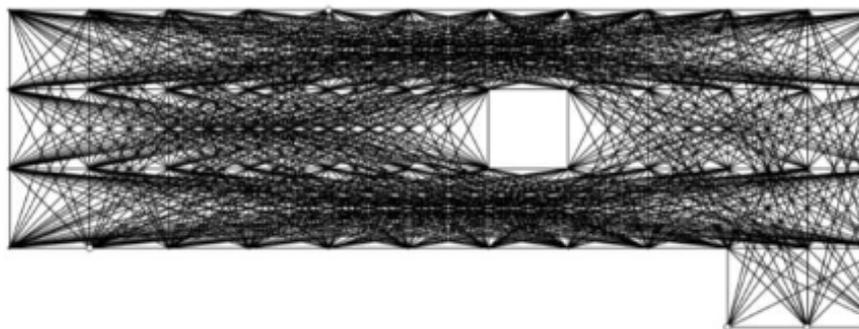


Figura 13: Malha treliçada (*Ground Structure*) - Viga engastada com vazio

Fonte: (Autores, 2018)

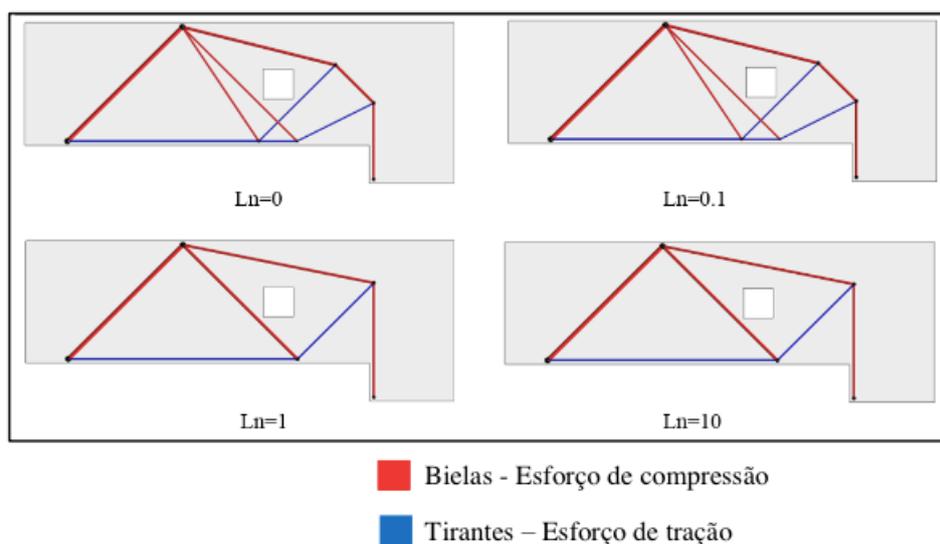


Figura 14. Topologia final - Viga engastada com vazio

Fonte: (Autores, 2018)

5.2.3 Viga com dente e vazio

A estrutura da Figura 15 representa uma viga gerber com vazio, dente e apoio, caracterizando uma região D.

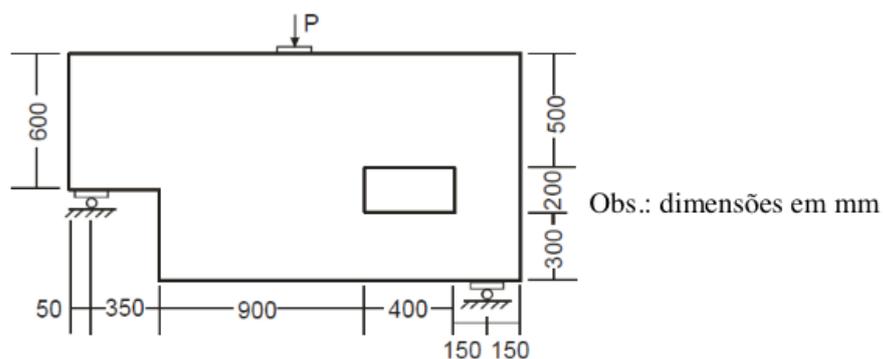


Figura 15. Viga com dente e vazio

Fonte: Kuchma (2008)

Para essa estrutura, Kuchma et al. (2008) disponibilizou alguns modelos de bielas e tirantes, os quais são apresentados na Figura 16.

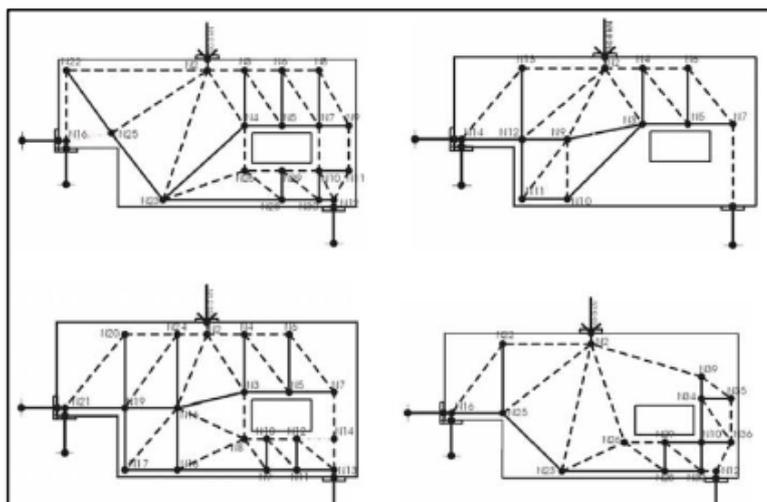


Figura 16. Modelos - Viga com dente e vazio

Fonte: Kuchma (2008)

Na Figura 17, apresenta-se o domínio e os elementos de base para a geração da malha do *Ground Structure* dessa estrutura em seguida a Figura 18 apresenta a malha gerada. Os resultados considerando a variação do custo nodal são ilustrados na Figura 19.

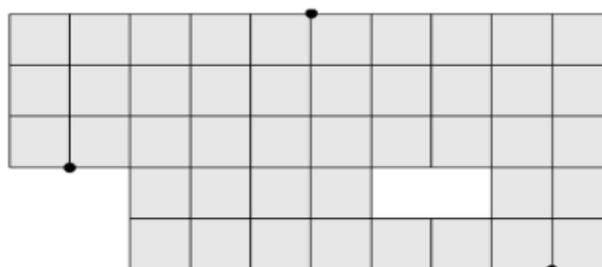


Figura 17. Malha de base para a malha treliçada (*Ground Structure*) - Viga com dente e vazio

Fonte: (Autores, 2018)

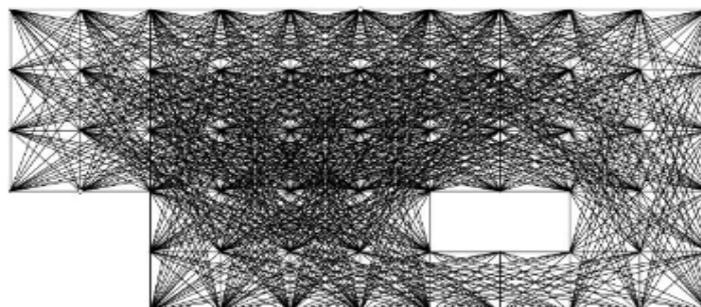


Figura 18: Malha treliçada (*Ground Structure*) - Viga com dente e vazio

Fonte: (Autores, 2018)

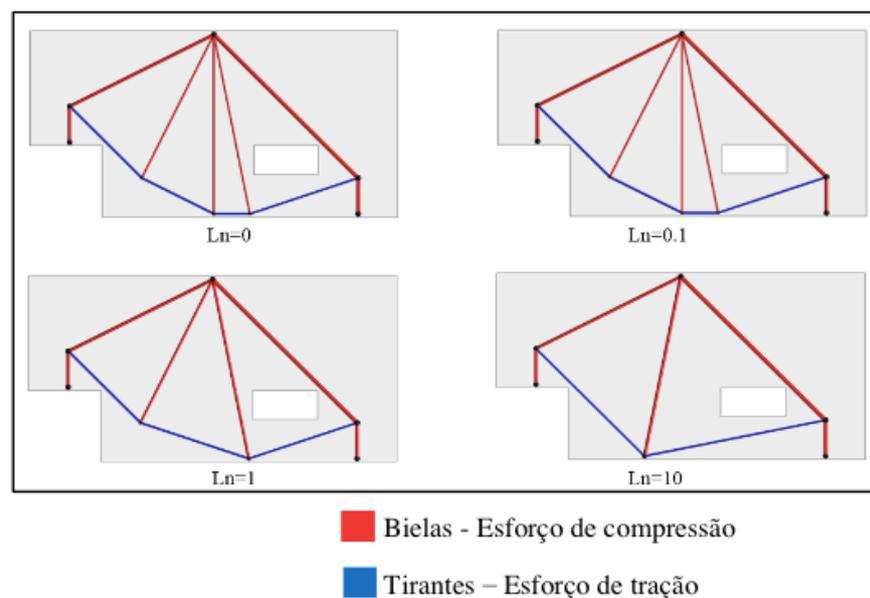


Figura 19. Topologia final - Viga com dente e vazio

Fonte: (Autores, 2018)

6 | CONCLUSÃO

O Método de Otimização Topológica, apesar de ainda ser pouco explorado na engenharia estrutural, possui aplicações úteis nessa área.

Na formulação utilizada observou-se que quanto maior o parâmetro do custo nodal (L_n) nas modelagens, mais simples foram as topologias finais das estruturas. As estruturas simplificadas possuem 20% do volume da estrutura inicial devido à restrição de volume imposta.

As topologias finais das estruturas geradas no programa de Sanders et al. (2017) são estruturas em equilíbrio e mais simples que os tradicionais modelos de bielas e tirantes encontrados na literatura. Assim, o Método de Otimização Topológica se apresenta como uma ferramenta bastante viável para o projeto de regiões de descontinuidade do concreto estrutural, fornecendo modelos com uma certa facilidade de serem executados.

REFERÊNCIAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), 2014. **NBR 6118: Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento**.

BENDSØE, M. P.; SIGMUND, O. **Topology optimization: theory, methods and applications**. Ed. 2. Berlim: Springer, 2003. 370p.

International Federation for Structural Concrete - Fédération Internationale du Béton (FIB). **Practitioners' guide to finite element modelling of reinforced concrete structures**. N° 45. FIB, 2008. 344p.

KUCHMA, D.; YINDEESUK, S.; NAGLE, T.; HART, J.; HWANG LEE, H. **Experimental validation of**

the strut-and-tie method for complex regions. In: ACI Structural Journal, 2008. 35p.

PANTOJA, J. C.; VAZ, L. E.; MARTHA, L. F.; SANTOS, S. H. C. **Projeto e avaliação do modelo de bielas e tirantes via otimização topológica e análise de confiabilidade.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, IBRACON, 52., 2010, Fortaleza.

SANDERS, E., RAMOS Jr., A., & PAULINO, G., 2017. **A maximum filter for the ground structure method: An optimization tool to harness multiple structural designs.** Elsevier, vol. 151, pp. 235–252.

SILVA, Reginaldo Carneiro da. **Concreto Armado: Aplicações de Modelo de Bielas e Tirantes.** São Carlos: USP, 1991.197f. Tese (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas – Escola de Engenharia de São Carlos da universidade de São Paulo, 1991.

SOUZA, Rafael Alves de. **Concreto Estrutural: Análise e dimensionamento de elementos com descontinuidade.** São Paulo: USP, 2004. 379f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas – Escola Politécnica da universidade de São Paulo, 2004.

WIGHT, J. K.; MACGREGOR, J. G. **Reinforced Concrete: Mechanics & Design.** Ed. 6. Pearson, 2012. 1157p.

Agência Brasileira do ISBN
ISBN 978-85-7247-432-0

