

Métodos numéricos aplicados na concepção arquitetônica e projeto estrutural da construção civil

ORGANIZADORES

João da Costa Pantoja
Leonardo da Silveira Pirillo Inojosa
Marcio Augusto Roma Buzar
Naiara Guimarães de Oliveira Porto
Nathaly Sarasty Narvaez





CENTRO DE INFORMAÇÃO
OSCAR NIEMEYER
TORRE DE TV DIGITAL DE BRASÍLIA

REITORA
VICE-REITOR
DECANA DE PESQUISA E INOVAÇÃO
DECANATO DE PÓS GRADUAÇÃO

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Márcia Abrahão Moura
Henrique Huelva
Maria Emília Machado Telles Walter
Lucio Remuzat Rennó Junior

DIRETOR
VICE DIRETORA

FACULDADE DE ARQUITETURA E URBANISMO
Caio Frederico e Silva
Maria Cláudia Candeia

COORDENAÇÃO DE PRODUÇÃO
DIAGRAMAÇÃO
FOTO CAPA

Valmor Cerqueira Pazos
Thalita Dantas Perfeito de Castro
Marcio Augusto Roma Buzar

CONSELHO EDITORIAL

Abner Luis Calixter
Ana Carolina Cordeiro Correia Lima
Humberto Salazar Amorim Varum
Marta Adriana Bustos Romero

ORGANIZADORES

João da Costa Pantoja
Leonardo da Silveira Pirillo Inojosa
Marcio Augusto Roma Buzar
Naiara Guimarães de Oliveira Porto
Nathaly Sarasty Narvaez

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)
(CÂMARA BRASILEIRA DO LIVRO, SP, BRASIL)

Métodos numéricos aplicados na concepção arquitetônica e projeto estrutural da construção civil [livro eletrônico] / organização João da Costa Pantoja...[et al.].
-- 1. ed. --

Brasília, DF : LaSUS FAU : Editora Universidade de Brasília, 2023.
PDF

Vários autores. Outros organizadores: João da Costa Pantoja, Marcio Augusto Roma Buzar, Leonardo da Silveira Pirillo Inojosa, Naiara Guimarães de Oliveira Porto, Nathaly Sarasty Narvaez.

Bibliografia.

ISBN 978-65-84854-12-3

1. Engenharia civil 2. Estruturas – Análise (Engenharia)

I. Pantoja, João da Costa. II. Buzar, Marcio Augusto Roma.

III. Porto, Naiara Guimarães de Oliveira. IV. Narvaez, Nathaly Sarasty.

V. Inojosa, Leonardo da Silveira Pirillo.

23-152448

CDD-624.15

ÍNDICES PARA CATÁLOGO SISTEMÁTICO:

1. Engenharia civil 624.15

Aline Grazielle Benitez - Bibliotecária - CRB-1/3129

ORGANIZADORES E AUTORES

JOÃO DA COSTA PANTOJA | ORGANIZADOR E AUTOR

LEONARDO DA SILVEIRA PIRILLO INOJOSA | | ORGANIZADOR E AUTOR

MARCIO AUGUSTO ROMA BUZAR | ORGANIZADOR E AUTOR

NAIARA GUIMARÃES DE OLIVEIRA PORTO | ORGANIZADOR E AUTOR

NATHALY SARASTY NARVAEZ | ORGANIZADOR E AUTOR

LUIZ FERNANDO MARTHA

LUIZ ELOY VAZ**

OSVALDO LUIZ C. SOUZA

EMIL DE SOUZA SÁNCHEZ FILHO

MARTA DE SOUZA LIMA VELASCO

PAUL ALEJANDRO ANTEZANA**

MARCO AURÉLIO BESSA

LENILDO SANTOS SILVA

JOSÉ HUMBERTO MATIAS DE PAULA

MARCOS H. RITTER DE GREGÓRIO

**** In memoriam**

O Congresso Ibero-Latino-Americano de Métodos Computacionais em Engenharia é um tradicional evento científico das áreas de Ciências e Engenharias, de regularidade anual, e que tem sido realizado desde o ano de 1977, quando foi organizado na cidade do Rio de Janeiro. A partir do ano de 2007, o CILAMCE tornou-se o evento anual promovido pela ABMEC. Ao longo das décadas, o evento já foi realizado em diversas cidades de todas as regiões do Brasil. Algumas edições também aconteceram em outros países, tais como: Argentina, Chile, Espanha, Itália, Portugal e França. É um evento internacional que atrai renomados pesquisadores e profissionais de diversos países, devido a sua relevância mundial para as áreas relacionadas ao desenvolvimento científico e tecnológico.

Durante o congresso são apresentados e discutidos desenvolvimentos de ponta relacionados aos Métodos Computacionais com aplicações diversas em Ciências Aplicadas, como a Arquitetura e Engenharia. O Congresso também abrange áreas como: Aeroespacial, Nuclear, Inteligência Artificial, Materiais Avançados, Indústria, Infraestrutura, Comunicações, Energias Renováveis, Monitoramento e Prevenção de Desastres Naturais, Saneamento Básico, Construção Civil, Segurança Hídrica, entre outras. Por este motivo, o CILAMCE tem papel fundamental como fórum de debate para pesquisadores e desenvolvedores de tecnologia de ponta de grande relevância para o desenvolvimento do país.

O mini simpósio denominado Métodos Numéricos Aplicados na Concepção Arquitetônica e Projeto Estrutural da Construção Civil presente desde 2016 no CILAMCE, visa aproximar as áreas do conhecimento e mostrar que o dimensionamento do sistema estrutural desempenha um papel essencial na determinação do projeto arquitetônico. Projetos que exploram a relação entre arquitetura e estrutura e a relação direta entre forma e estrutura, onde a definição do sistema estrutural tem participação efetiva desde sua concepção, proporcionam obras marcadas pela ousadia estrutural e grandes desafios tecnológicos.

Este mini simpósio visa reunir contribuições e obter dados que, por meio de análises que utilizam tecnologias computacionais e métodos numéricos, permitam entender como o projeto estrutural aliado à criação arquitetônica proporciona resultados estéticos inovadores. Estudos nesse sentido ressaltam a importância do conhecimento técnico para a realização de projetos de boa qualidade, evidenciando o protagonismo do sistema estrutural na forma arquitetônica. Essas análises contribuem para o entendimento da importância do conhecimento técnico e tecnológico promovido via métodos numéricos na produção de uma arquitetura inovadora.

A coordenação do mini simpósio Métodos Numéricos Aplicados na Concepção Arquitetônica e Projeto Estrutural da Construção Civil é feita desde 2016 pelos professores Dr. Eng. João Costa Pantoja e Dr. Eng. Márcio Augusto Roma Buzar, ambos do Departamento de Tecnologia da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo e pelo Dr. Arq. Leonardo da Silveira P. Inojosa do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Faculdade de Tecnologia, todos professores da Universidade de Brasília (UNB). Este livro traz uma coletânea de contribuições dos coordenadores em conjunto com outros autores, pesquisadores colaboradores da área desde 2009, com artigos que precederam e deram origem à criação do mini simpósio, abrangendo o período de 2016 até 2022 já apresentados no mini simpósio.

Aproveitamos para agradecer ao Grupo de Pesquisa da Universidade do Porto da Unidade de Investigação CONSTRUCT - Instituto de I&D em Estruturas e Construções - financiada por fundos nacionais através da FCT/MCTES (PIDDAC) pela parceria e participação na montagem e revisão dos textos dos artigos envolvidos.

Agradecemos imensamente a contribuição dada por todos.

Junho de 2023

ÍNDICE

MODELO DE BIELAS E TIRANTES GERADOS POR OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA E ELEMENTOS INDUTORES

1	INTRODUÇÃO	19
2	OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA COMO PROCEDIMENTO DE PROJETO	20
3	FORMULAÇÃO DO PROBLEMA VIA MÉTODO SIMP	21
3.1	Minimização da energia de deformação com aplicação das restrições	21
4	RESOLUÇÃO DO PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO	24
4.1	Método das Assíntotas Móveis – MMA	24
5	ELEMENTOS INDUTORES	27
6	EXEMPLOS	28
6.1	Estrutura de Viga Parede – VP1	28
6.2	Estrutura de Viga Parede – VP2	31
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	33
8	AGRADECIMENTOS	34
9	REFERÊNCIAS	34

UM CRITÉRIO BASEADO EM CONFIABILIDADE PARA AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE MODELOS DE BIELAS E TIRANTES EM ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO

1	INTRODUÇÃO	39
2	OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA COMO PROCEDIMENTO DE PROJETO	40

2.1	Exemplo	41
3	MODELO PROPOSTO PELO ACI 318-02 (2002)	42
4	MODELO OBTIDO VIA OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA 39	43
5	CRITÉRIO BASEADO EM CONFIABILIDADE	44
6	FUNÇÕES DE ESTADO DOS MODELOS DE BIELAS E TIRANTES	46
7	MODELO 1 E 2	46
8	RESULTADOS	47
9	CONCLUSÕES	57
10	REFERÊNCIAS	58

O IMPACTO DAS INCERTEZAS EPISTÉMICAS SOBRE O NÍVEL DE SEGURANÇA DAS VIGAS DE CONCRETO ARMADO SUJEITAS A TORÇÃO PURA E REFORÇADAS COM POLÍMERO REFORÇADO COM FIBRA DE CARBONO – CFRP

1	INTRODUÇÃO	59
2	ANÁLISE DE CONFIABILIDADE	59
3	DESCRIÇÃO DA ANÁLISE	62
3.1	Modelo Considerado	62
3.2	Variáveis Aleatórias do Problema	63
3.3	Funções de Estado	64
3.4	Método de Resolução	65
4	RESULTADOS OBTIDOS	66
5	CONCLUSÕES	68
6	REFERÊNCIAS	69

DIMENSIONAMENTO E VERIFICAÇÃO DA SEGURANÇA VIA ANÁLISE DE CONFIABILIDADE DE UMA VIGA DE CONCRETO ARMADO SUBMETIDA AO ESFORÇO CORTANTE

1	INTRODUÇÃO	75
2	EXPRESSÕES DE DIMENSIONAMENTO DE UMA SEÇÃO DE CONCRETO ARMADO SUBMETIDA AO ESFORÇO CORTANTE	76
2.1	Expressões da NBR 6118-2003 pelo Modelo I para viga sem reforço	76
2.2	Expressões da NBR 6118-2003 pelo Modelo I para viga sem reforço	77
2.3	Modelo de Cálculo Considerando Falha por Ruptura do Compósito	78
2.4	Modelo de Cálculo Considerando Falha por Descolamento do Compósito	80
2.5	Espaçamento das faixas	82
3	ANÁLISE DA CONFIABILIDADE	82
4	FUNÇÕES DE FALHA ASSOCIADAS ÀS EXPRESSÕES DE DIMENSIONAMENTO DE UMA SEÇÃO DE CONCRETO ARMADO SUBMETIDA AO ESFORÇO CORTANTE	84
4.1	Funções de falha para análise de confiabilidade da viga sem reforço	84
4.2	Funções de falha para análise de confiabilidade da viga com reforço	85
4.3	Função de falha relativa à ruína por tração diagonal, devido à ruptura do reforço	86
5	EXEMPLO DE APLICAÇÃO	87
5.1	Dimensionamento da armadura de estribo da seção S1 da viga V2 pela NBR 6118 – 2003	87

5.2	Análise de confiabilidade da seção S1 da viga V2 dimensionada no item	88
5.3	Dimensionamento baseado em confiabilidade da seção S1 da viga V2 dimensionada no item 5.1.	89
5.4	Mudança na solicitação. Análise de confiabilidade da seção S1 da viga V2 dimensionada no item 5.3.	90
5.5	Dimensionamento da área da seção de fibra de carbono CFC da seção S1 da viga V2 submetida às novas cargas acidentais conforme a metodologia de Chen e Teng (2003 a, b.)	91
5.6	Análise de confiabilidade da seção S1 da viga V2 dimensionada no item 5.5.	91
5.7	Dimensionamento baseado em confiabilidade da área da seção de fibra de carbono CFC da seção S1 da viga V2 dimensionada no item 5.5.	92
6	CONCLUSÕES	93
7	REFERÊNCIAS	94

MODELO DE OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA E CRITÉRIO DE CONFIABILIDADE PARA A CONCEPÇÃO E ANÁLISE DE REGIÕES-D COMPLEXAS EM ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO

1	INTRODUÇÃO	99
2	ANÁLISE DE CONFIABILIDADE	99
3	ÍNDICE DE CONFIABILIDADE	101
4	FORM (First Order Reliability Method)	102
5	MÉTODO DE MONTE CARLO	102
6	DESCRIÇÃO DO PROBLEMA	103

6.1	Estrutura analisada	103
7	INCERTEZAS ALEATÓRIAS OU RANDÔMICAS	104
8	INCERTEZAS EPISTÊMICAS	105
9	METODOLOGIA DE ANÁLISE	107
10	APLICAÇÃO NUMÉRICA E DISCUSSÃO	107
11	REFERÊNCIAS	109

GERAÇÃO AUTOMÁTICA DE ENVOLTÓRIAS TOPOLOGICAS APLICADAS EM MODELOS DE BIELAS E TIRANTES UTILIZANDO TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO

1	INTRODUÇÃO	114
2	GERAÇÃO AUTOMÁTICA DE MODELOS DE BIELAS E TIRANTES	115
3	OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA	115
3.1	Metodologia SIMP	116
3.2	Envoltória topológica	119
4	OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO	119
4.1	Definição do problema	119
4.2	Conceito de ótimo de Pareto	120
4.3	Métodos de geração de pontos de Pareto	121
4.4	Método dos coeficientes de ponderação	122
5	APLICAÇÕES NUMÉRICAS E DISCUSSÕES	123
5.1	Consolo curto com furo no centro	123
5.2	Viga parede com balanço e com furo no centro	125

6	CONCLUSÕES	127
7	REFERÊNCIAS	128

ANÁLISE DE ESTABILIDADE DA TORRE TV DIGITAL DE BRASÍLIA

1	INTRODUÇÃO	133
2	PROCEDIMENTOS ADOTADOS	135
2.1	Carregamentos	135
3	ANÁLISE DAS FUNDAÇÕES	137
3.1	Apresentação da fundação	137
3.2	Verificação da Fundação	139
4	ANÁLISE DA ESTRUTURA DA TORRE	140
4.1	Apresentação da estrutura analisada	140
4.2	Análise estrutural	141
4.3	Verificação do dimensionamento	142
5	ANÁLISE DA TORRE COMO HASTE	142
6	ANÁLISE DE VIBRAÇÃO DEVIDO À ATUAÇÃO DA CARGA DE VENTO	146
7	CONCLUSÃO	148
8	REFERÊNCIAS	148

ANÁLISE DO PROJETO ESTRUTURAL DO EDIFÍCIO DO RESTAURANTE JUNTO AO PRÉDIO ADMINISTRATIVO DO SUPERIOR TRIBUNAL DE JUSTIÇA - STJ

1	INTRODUÇÃO	152
2	CONTEXTO ARQUITETÔNICO	152

2.1	Bloco da Administração	154
2.2	Blocos dos Ministros I e II	154
2.3	Bloco dos Plenários	154
2.4	Bloco do Tribunal Pleno	155
2.5	Bloco do Auditório	155
3	CONSIDERAÇÕES GERAIS	155
3.1	Características Técnicas	156
3.2	Normas	157
3.4	Topologia	158
3.5	Ações	158
4	ANÁLISE ESTRUTURAL	159
4.1	Análise Estática Linear e Não Linear	159
3.2	Análise de Instabilidade Global	163
5	VERIFICAÇÃO DE SEGURANÇA	164
5.1	Lajes do Teto do Subsolo	164
5.2	Análise de Instabilidade Elástica	164
5.3	Análise de Frequência Natural da Estrutura de Concreto	166
6	CONCLUSÃO	167
7	AGRADECIMENTOS	167
8	REFERÊNCIAS	167

ANÁLISE DE SEGURANÇA E DESEMPENHO ESTRUTURAL DO AUTÓDROMO INTERNACIONAL DA CAPITAL FEDERAL DO BRASIL, BRASÍLIA-DF

1	INTRODUÇÃO	172
2	ENSAIOS TECNOLÓGICOS E OBSERVAÇÕES DE CAMPO	174
2.2	Ensaio de Carbonatação	174
2.3	Constatações da Inspeção	177
3	ANÁLISE NUMÉRICA	180
3.1	Análise limite em serviço	181
3.2	Análise de Vibrações Livres (Análise Modal)	183
3.3	Análise de Instabilidade elástica	187
3.4	Análise de esforços e dimensionamento	189
4	CONCLUSÕES	190

CÁLCULO DE REAÇÕES EM VIGAS DE BORDO PARA LAJES NERVURADAS UNIDIRECIONAIS

1	INTRODUÇÃO	197
2	NORMATIZAÇÃO	198
2.1	Lajes disponíveis no Mercado	198
3	CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA	199
3.1	Reações dos apoios das lajes	199
4	METODOLOGIA	200
5	RESULTADOS	203
6	ANÁLISE DOS RESULTADOS	204

6.1	Altura da Capa	204
6.2	Lambda	206
6.3	Altura da nervura	206
6.4	Rigidez das vigas de bordo	208
6.5	Fissuração das vigas de bordo	209
6.6	Rigidez dos pilares	209
6.7	Avaliação global	209
7	CONCLUSÕES	217
8	REFERÊNCIAS	218

Geração automática de envoltórias topológicas aplicadas em modelos de bielas e tirantes utilizando técnicas de otimização multiobjetivo

João da Costa Pantoja

Universidade de Brasília,
Faculdade de Arquitetura e Urbanismo
Brasília-DF, Brasil
Pesquisador do Grupo CONSTRUCT-LESE - Faculdade de Engenharia
da Universidade do Porto
joaocpantoja@gmail.com
lattes: <http://lattes.cnpq.br/6879105340639188>

Luiz Fernando Martha

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro
lfm@tecgraf.puc-rio.br
lattes: <http://lattes.cnpq.br/2540733672905515>

Luiz Eloy Vaz

Universidade Federal Fluminense
Rio de Janeiro-RJ, Brasil
Lattes: <http://lattes.cnpq.br/4321281058166070>

Paul Antezana

Universidade Católica de Brasília
Brasília-DF, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/3026061815481087>

Geração automática de envoltórias topológicas aplicadas em modelos de bielas e tirantes utilizando técnicas de otimização multiobjetivo

João da Costa Pantoja | Luiz Fernando Martha
Luiz Eloy Vaz | Paul Antezana

Resumo

A proposta deste trabalho é o desenvolvimento de uma metodologia que utilize um algoritmo de otimização topológica com técnica de otimização multiobjetivo, para a geração automática de um conjunto topológico de uma envoltória topológica que possa representar uma região viável nas estruturas de concreto bidimensional utilizando o modelo de bielas e tirantes. Devido a uma variação realista das cargas do projeto, são necessárias algumas funções objetivas e deve ser construída uma superfície de Pareto. Isto é realizado utilizando um algoritmo de otimização apropriado. Dois problemas de estruturas de concreto bidimensional são submetidos a múltiplas cargas, após análise e obtenção das regiões viáveis correspondentes, confirmando a validade da metodologia.

Palavras-chave

Otimização topológica, Otimização multiobjetivo, superfície de Pareto.

Automatic generation of topology envelopes applied in strut and tie models using multiobjective optimization techniques

Abstract

The proposal of this work is the development of a methodology that uses an algorithm of topology optimization with multi-objective optimization technic, for automatic generation of a topology set of an envelope that may represent a viable region in the bi- dimensional concrete structures using strut-and-tie model. Due to a realistic variation of project loadings some objective functions are required and a Pareto frontier should be built. That is performed using an appropriate optimization algorithm. Two problems of bi- dimensional concrete structures are submitted to multiple loadings, after analysis is presented and the correspondent viable regions obtained, confirming the validity of the methodology.

Keywords

Topology Optimization, Multi-objective Optimization, Pareto Surface.

1 INTRODUÇÃO

O projeto de viga paredes via o modelo de bielas e tirantes, está Em geral, a resposta de uma determinada estrutura aos carregamentos aplicados e de suas correspondentes condições de apoio, pode levar a uma distribuição interna de deformações linear ou não. Isso ocorre quando a estrutura possui alguma forma geometricamente descontínua ou carregamento concentrado. Áreas com uma distribuição linear de deformações são conhecidas como regiões B (Bernoulli) enquanto que áreas como distribuições não lineares são denominadas regiões D (Discontinuity) conforme proposto por Schlaich et al. (1987). Regiões D são pontos estruturais críticos sujeitos a danos, onde fenômenos do tipo fissuração podem ocorrer. Sendo assim, os códigos normativos relativos a estruturas de concreto de vários países como EUA, Alemanha, Espanha entre outros, propõem projetos separados para regiões B e D de modo a garantir eficiência e economia aos mesmos.

Na aplicação prática de projetos estruturais, os critérios utilizados no projeto de regiões B já são bastante conhecidos e difundidos. No entanto, o projeto de regiões D é executado com base na experiência ou por decisões baseadas no conhecimento estrutural do projetista responsável pelo projeto. O modelo de bielas e tirantes introduzido por Schlaich et al (1987) é uma alternativa bastante interessante para o projeto de regiões D. Essa metodologia têm uma série de vantagens (Silva et al., 2000) e suas orientações tem sido utilizadas frequentemente pelos códigos normativos de vários países.

Um projeto estrutural baseado no modelo de bielas e tirante aplicado de modo convencional requer um procedimento de tentativa e erro que é orientado principalmente pela experiência e decisões dos projetistas envolvidos de forma a garantir o funcionamento correto e a segurança das regiões D. Apesar do modelo de bielas e tirantes ser conceitualmente simples, sua aplicação na forma discreta não é na maioria das vezes intuitiva. A direção e espessura das bielas e a posição dos tirantes são determinadas pelas linhas de tração e compressão das tensões principais e calculadas através da análise linear de elementos finitos de barras (treliças). Contudo, na prática é bastante penoso o lançamento de um modelo de treliça quando a distribuição de tensões é complexa devido à ocorrência de múltiplos carregamentos e condições de contorno especiais.

De modo a reduzir o processo de tentativa e erro no modelo de bielas e tirantes e melhorar sua eficiência nas situações onde existam perturbações nas tensões, foi introduzida a ideia de projeto ótimo. Desde então, uma série de métodos de otimização topologia de elementos de treliça têm sido desenvolvidos e utilizados para avaliação dos modelos de treliça nas estruturas de

concreto armado (Ali et al. 2001, Biondini 2001). Métodos dessa natureza porém, possuem a desvantagem de necessitarem de uma geração inicial de barras dentro do domínio de projeto. Também a direção do fluxo de forças fica condicionada as direções das barras previamente definidas.

De maneira a ultrapassar os problemas dos métodos discretos, alguns métodos de otimização topológica do contínuo foram então propostos (Bendsøe e Kikuchi, 1988 e Xie and Steven, 1993). Nesse estudo um método de otimização topológica de material denominado SIMP (Solid Isotropic Microstructure Penalization) é utilizado na obtenção das topologias ótimas dos modelos de bielas e tirantes a serem empregados em estruturas planas de concreto armado. A estratégia de obtenção de topologia é baseada na remoção de áreas ineficazes para rigidez da estrutura através de um método de tentativa e erro, que conduz a uma estrutura de barras (treliça) apropriada à aplicação do método das bielas e tirantes. Também uma otimização multiobjetivo é aplicada para generalizar a topologia do modelo.

2 GERAÇÃO AUTOMÁTICA DE MODELOS DE BIELAS E TIRANTES

Atualmente uma série de trabalhos tem sido feitos no sentido de automatizar a concepção do modelo de bielas e tirantes dentro da estrutura de concreto. Isso se deve a problemática de dispor de forma a mais adequada possível os elementos dentro da estrutura levando a um modelo eficiente. Essa tarefa nem sempre é simples e em alguns casos onde a geometria é complexa, pode ser bastante difícil uma solução coerente. Isso poderia conduzir a modelos inseguros uma vez que não representem o funcionamento correto da estrutura.

Assim a perspectiva de uma metodologia que auxilie o projetista estrutural nessa tarefa pode ser bastante interessante do ponto de vista da utilização do modelo. Uma explicação bastante completa e que abrange uma série de trabalhos nesta área de pesquisa e suas principais características pode ser encontrado em Souza (2004). Nesse trabalho apenas serão mostrados apenas aspectos relativos à utilização da otimização topológica nesse tipo de modelagem.

3 OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA

Otimização topológica pode ser entendida como um método computacional capaz de sintetizar estruturas através da distribuição de material em uma determinada região do espaço. Para isso utilizada da combinação do método dos elementos finitos (MEF) e os métodos de otimização. Assim, uma região do

espaço é discretizada em elementos finitos de modo que se possa analisar seu comportamento, e então, é distribuído material de forma racionalizada através de algoritmos de otimização.

Uma vantagem da otimização topológica é sua capacidade de fornecer o layout ótimo de um componente estrutural ou mesmo da própria estrutura, para certa aplicação. Assim, este método pode ser aplicado durante a fase do projeto conceitual, diferentemente dos métodos tradicionais de otimização, como a otimização paramétrica ou de forma, que só podem ser aplicados após a definição do layout da estrutura. Desse modo, a otimização topológica pode ser definida como um processo de síntese estrutural.

Um problema típico de otimização topológica é a seleção da melhor configuração possível para o projeto de uma estrutura. Na última década, muita atenção em sido dada para o desenvolvimento dos métodos de otimização topológica do contínuo. Bendsoe & Kirkuchi (1988) propuseram um método otimização baseado em homogeneização que trata a otimização topológica do contínuo como um problema de redistribuição dos materiais. Atualmente existem uma série de técnicas utilizadas na resolução dos problemas de otimização topológica. A adotada neste trabalho é a formulação SIMP (Solid Isotropic Material with Penalization).

A formulação via método SIMP surgiu como uma opção simples de introduzir o material com propriedades intermediárias similares às que se obtêm com o uso de microestruturas e técnicas de homogeneização. No entanto, no caso da metodologia SIMP, este material intermediário, normalmente definido na forma de densidade artificial, é usado apenas como artifício matemático enquanto na técnica de homogeneização o material intermediário pode corresponder a um material composto ou microestruturado. A função densidade artificial definida pelo SIMP é então utilizada como variável de projeto, definida no domínio Ω , no intuito de determinar quais regiões devem possuir material e quais devem ser vazias.

Considerando a necessidade de definição de regiões vazias ou não, representa-se o material sólido como uma densidade artificial $\rho = 1$ e o vazio $\rho = 0$, variando ρ entre estes dois limites. No presente contexto, as densidades artificiais intermediárias não têm nenhum interesse prático, logo técnicas que penalizem estes valores devem ser utilizadas no intuito de se evitar a incidência deste tipo de região no domínio analisado.

3.1 Metodologia SIMP

No problema de otimização a ser considerado, a variável de projeto x^e representa a densidade relativa do material em cada

elemento e , assim $\rho = x^e \rho_0$. A densidade ρ é a densidade de apenas um elemento no domínio de projeto Ω . Caso o elemento do domínio seja sólido teremos $x^e = 1$. Podemos representar a rigidez para um elemento como $k^e = (x^e)^p k^0$. Assim, a formulação via flexibilidade ou energia de deformação da estrutura será:

$$(1) \quad C = F^T u = u^T k u = \sum_{e=1}^N u^e k u^e = \sum_{e=1}^N x^p u^e k^0 u^e$$

O número de elementos será denominado N e p é um fator de penalidade. Fazendo o fator de penalidade igual à unidade, elementos com densidades intermediárias irão ocorrer com frequência. Fazendo o fator de penalidade igual a 3, de uma forma contrária, o projeto final conterá elementos que estão totalmente preenchidos de material(sólido) ou com nenhum material(vazio). Esta formulação é normalmente denominada como problemas do tipo 0-1. O volume de material V pode então ser representado então na forma:

$$(2) \quad V = x^t v$$

Denominaremos de V_0 o volume do domínio de projeto. Podemos então partir para formulação de um problema de otimização onde queremos minimizar a flexibilidade ou a energia de deformação da estrutura, na forma:

Minimizar: $C = F^T u$

Sujeito a: $f = \frac{v}{v_0}$ (restrição de volume)

$F = k * u$ (restrição de equilíbrio)

$0 < x_{min} \leq x^e \leq x_{max}$ (restrições laterais)

Podemos notar que x_{min} e x_{max} serão os limites inferiores e superiores da variável de projeto. Neste caso, escolheremos $x_{max} = 1$ e $x_{min} = 0.001$. A função do limite inferior é prevenir contra uma possível singularidade na matriz de rigidez da estrutura. Nos exemplos a serem apresentados a restrição na fração do volume final do domínio de projeto foi variada de forma a melhor se adequar ao estudo pretendido.

Na formulação SIMP algumas prerrogativas são feitas, de modo que as características do material, como por exemplo, o módulo de elasticidade, num elemento discreto é considerado constante. Se ρ_0 é a densidade inicial do elemento e ρ é a densidade após a otimização, então é preciso impor ao problema

de otimização uma taxa de redução no volume de material existente representado pela relação entre as densidades na forma $\rho = \rho_e / \rho_0$ a restrição de volume apresentada no problema de otimização têm essa função.

As características do material dentro de um elemento podem ser modificadas através de uma relação exponencial na densidade do elemento. Se E_0 e E , são os módulos de elasticidade do elemento antes e depois da otimização, respectivamente, então vale a relação $E = (\rho_e)^\rho E_0$. Se k_0 e k , são a rigidez inicial e posterior à otimização, respectivamente, também a relação $k = (\rho_e)^\rho E_0$ é válida. O parâmetro ρ têm a função de penalizar as densidades intermediárias, de maneira a decrescer o número de elementos com esse tipo de densidades e induzir que a maioria das densidades dos elementos fique entre 0 e 1.

Uma vez consideradas as pré-condições acima, cada elemento possui apenas uma variável de projeto. Comparado com o método da homogeneização, a formulação do método SIMP traz excelentes progressos na diminuição do número de variáveis de projeto. Outra vantagem do método SIMP é que as características do material após as modificações são escritas como uma função exponencial da densidade e das características do material no instante inicial da análise, sendo assim esta formulação, simplifica muito a solução da otimização topológica. Um diagrama de fluxo para formulação de um problema de otimização topológica via método SIMP é mostrado na Figura 3.9.

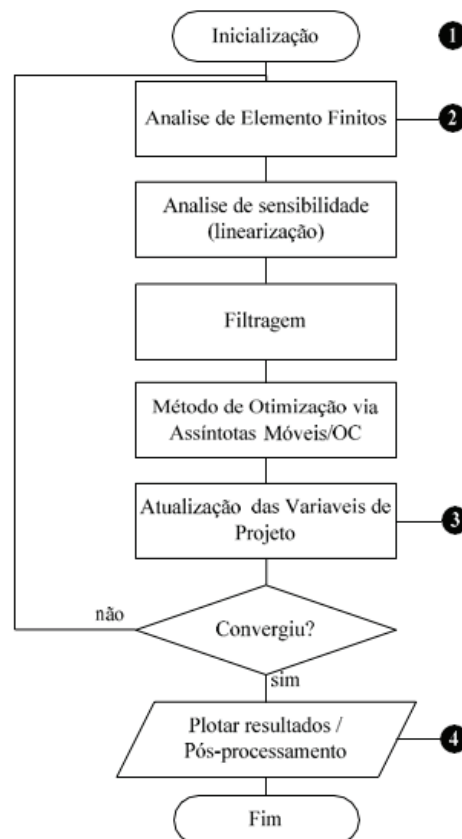


Figura 1
Diagrama de fluxo
– Método SIMP.
Fonte: autor (2011)

3.2 Envoltória topológica

Um problema existente na aplicação de topologias para modelos de bielas e tirantes é quando há mais de uma carga cujos valores relativos podem mudar, por exemplo, cargas acidentais não correlacionadas do tipo vento e carga móvel de uma ponte, podem ter intensidades diferentes. Sendo assim, cada par de valores relativos, levaria a uma nova topologia. Esse artigo apresenta uma metodologia para geração de um único modelo topológico que satisfaça as restrições de todos os possíveis casos de carga. Esse problema pode ser formulado como um problema de otimização multiobjetivo cuja obtenção da topologia ótima deve passar pela geração e consideração de uma série de modelos topológicos ótimos diferenciados. Denominou-se a esse modelo final de envoltória topológica.

4 OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO

O projeto ótimo de aplicado a problemas reais muitas vezes envolve várias metas, na forma de funções objetivo, a serem aprimoradas e várias restrições a serem satisfeitas. No entanto, os algoritmos usualmente utilizados na literatura sobre otimização são capazes de resolver apenas problemas que possuam somente uma função objetivo. Problemas de otimização que resolvem simultaneamente várias funções objetivo são denominada como problemas de otimização multiobjetivo (Arora, 2006).

A estratégia mais usual nos problemas de otimização multiobjetivo é: O conceito de Pareto. No presente trabalho apenas a formulação através do conceito de Pareto será utilizada na obtenção das topologias ótimas.

4.1 Definição do problema

Um problema multiobjetivo (POM) pode ser expresso na forma:

$$(3) \quad \min_x F(x) = [f_1(x), f_2(x), f_3(x), \dots, f_{nobj}(x)], n_{obj} \geq 2$$

Sujeito as seguintes restrições:

$$(4) \quad h_k(x) = 0 \quad k = 1, \dots, n_e$$

$$(5) \quad x_{lj} \leq x_j \leq x_{ju} \quad j = 1, \dots, npv$$

onde:

- $x \rightarrow$ Vetor das variáveis de projeto;
- $F(x) \rightarrow$ vetor das funções a serem minimizadas
- $h_k(x) \rightarrow$ Função restrição de igualdade;
- $g_i(x) \rightarrow$ Função restrição de desigualdade;
- $ne \rightarrow$ Número de funções de igualdade;
- $ni \rightarrow$ Número de funções de desigualdade;
- $npv \rightarrow$ Número de variáveis de projeto;
- $\mathbb{R}^{npv} \rightarrow$ Espaço das variáveis de projeto;

4.2 Conceito de ótimo de Pareto

Nos problemas de otimização multiobjetivo encontrar um x^* que minimize várias funções objetivo simultaneamente é uma tarefa extremamente difícil. Uma forma de determinar uma solução que satisfaça em parte as equações presentes na otimização multiobjetivo está contida na definição de Otimalidade de Pareto segundo Arora (2006).

Pontos de Pareto são pontos x^p tais que não exista nenhum ponto x o qual:

- $f_k(x) \leq f_k(x^p)$ para $k = 1, \dots, n$
- $f_k(x) < f_k(x^p)$ para uma função objetivo a menos.

Os pontos de pareto apresentam a propriedade de que quando se movem na direção decrescente de uma das funções, pelo menos uma das outras funções restantes tem seu valor aumentado. Na Figura 2 podemos perceber isso, onde o ponto de ótimo de Pareto é qualquer ponto no intervalo $x_1 \leq x \leq x_2$. Também, devido às restrições, pode estar localizado ao longo do contorno da região viável.

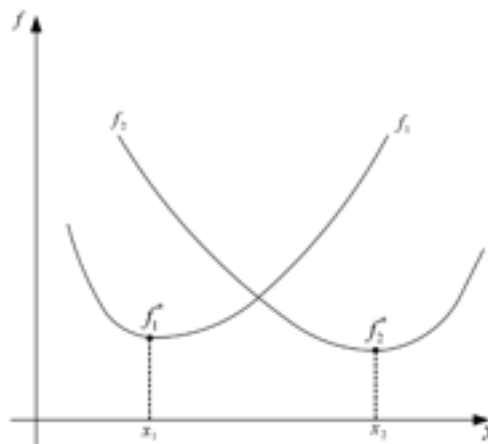


Figura 2
Problema de otimização com uma variável e duas funções objetivo.
Fonte: autor (2011)

Em problemas de otimização multiobjetivo é muito importante formular o problema no espaço das funções objetivo. Isto pode ser feito usando-se um sistema de equações geradas pelas funções objetivo e conjunto das restrições ativas. Para cada projeto viável, haverá correspondentes valores das funções objetivo que definirão o espaço viável das funções objetivo. Sobre o seu contorno se localizam os pontos ótimos de Pareto. Na figura 3, um problema com duas variáveis de projeto e duas funções objetivo é mostrado. Em ambas as figuras, a linha tracejada representa os pontos ótimos de Pareto.

O interesse do projetista em problemas multiobjetivo é encontrar um vetor de variáveis de projeto x^* tal que as equações (4) e (5) sejam satisfeitas. Normalmente, pode não existir tal x^* devido ao aspecto de conflito comum entre as funções objetivo. Usando o conceito de Pareto, o projetista tem encontrar tantos pontos quanto possíveis. A partir desses pontos, será escolhido o projeto o qual irá satisfazer, mais adequadamente, cada função objetivo.

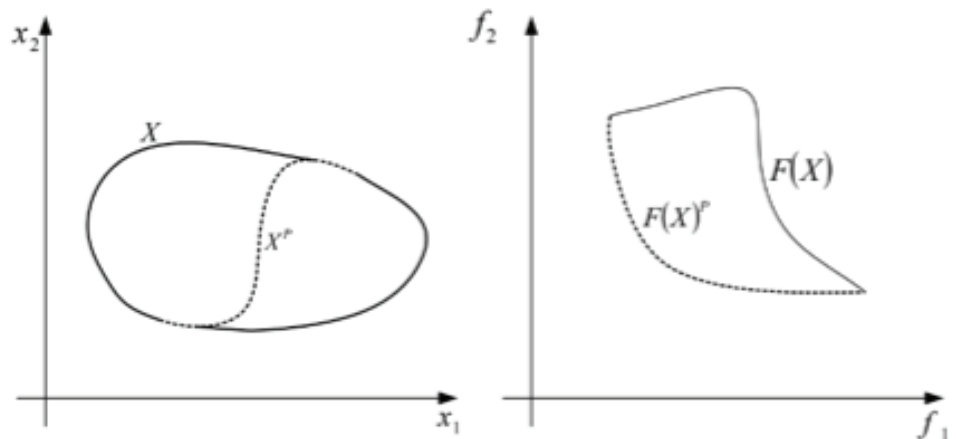


Figura 3

Região viável e pontos de Pareto no espaço das variáveis de projeto e no espaço das funções objetivo. Fonte: autor (2011)

4.3 Métodos de geração de pontos de Pareto

Neste trabalho apenas uma técnica para geração dos pontos de Pareto será aplicada. Essa técnica será desenvolvida diretamente no algoritmo de otimização SIMP que através de uma geração contínua de pontos de projeto ótimos (par de valores relativos) com base combinação linear dos carregamentos. Esse método é conhecido como método dos coeficientes de ponderação (Ibañez 1990).

4.4 Método dos coeficientes de ponderação

No método dos coeficientes de ponderação um vetor λ , relativo aos coeficientes de ponderação, é definido de forma a modificar a função objetivo mediante o produto:

$$(6) \quad F = \alpha^T F = \sum_{k=1}^n \alpha_k f_k$$

onde os coeficientes do vetor λ são convenientemente normalizados de forma que cumpram:

$$(7) \quad \sum_{k=1}^n \alpha_k f_k = 1, 0 \leq \alpha_k \leq 1$$

e f_{ok} é a função objetivo k no projeto inicial x_0 .

A função F da Equação (6) é otimizada nesse método. Variando os coeficientes α_k , uma série de topologias aparecerá correspondente aos mínimos de Pareto. Esse método apresenta inconveniente quando o conjunto é não convexo, sendo esse o caso quando não é possível a obtenção de todos os valores de mínimo mediante a combinação linear da equação (6) conforme mostrado na Figura 3. A escolha dos valores dos coeficientes é muito importante uma vez que é necessário identificar completamente a geometria do conjunto de soluções. Problemas na obtenção dos pontos de Pareto através da utilização do método poderão surgir quando o contorno da região viável no espaço das funções for não-convexo, como mostra a figura 4. Neste caso, não existirá nenhum α_k , capaz de fornecer uma solução que esteja na parte não-convexa.

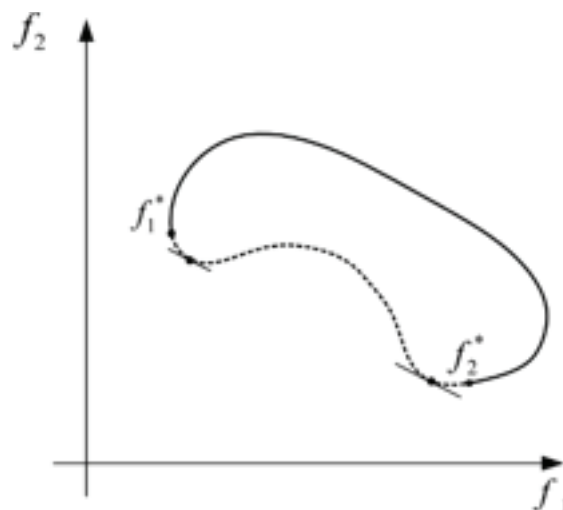


Figura 4
Região viável não-convexa
no espaço das
funções objetivo.
Fonte: autor (2011)

5 APLICAÇÕES NUMÉRICAS E DISCUSSÕES

De modo a exemplificar a metodologia proposta dois exemplos foram escolhidos. São exemplos de estruturas planas com carregamentos aplicados nos nós e condições de apoio pré-definidas. Os carregamentos existentes nos exemplos sofreram uma variação linear nos valores sendo que para cada um dos pares de valores uma solução ótima para topologia foi obtida. Os parâmetros de cada exemplo relativos a refinamento da malha, fração do volume de material, raio de sensibilidade e etc, são descritos a seguir para cada caso específico. Para cada um dos exemplos uma envoltória de topologias é obtida com base nos resultados parciais. O modelo de bielas e tirantes então pode ser concebido levando em consideração todos os casos existentes de carregamentos. Uma vez que uma superfície de pontos do tipo Pareto foi construída, denominou-se a região geometricamente viável, obtida por todos os modelos de topologias considerados de envoltória topológica de Pareto.

Nos casos apresentados a seguir apenas dois carregamentos diferentes foram considerados. Isso simplifica consideravelmente o problema, pois a necessidade de outros carregamentos levaria a uma geração de pontos de Pareto mais sofisticada. No entanto, a metodologia proposta é bastante geral e pode ser utilizada de modo bastante eficaz na geração de modelo de bielas e tirantes.

5.1 Consolo curto com furo no centro

O primeiro exemplo considerado é uma estrutura de consolo curto com um buraco na sua região central e dois carregamentos atuantes P1 e P2. A carga P1 na parte superior do consolo no sentido vertical e a carga P2 na parte inferior no sentido horizontal conforme mostra a Figura 5. Um furo com diâmetro igual a $L/4$ foi considerado de forma centralizada na estrutura. Um engastamento foi considerado no lado esquerdo do consolo de modo a estabilizar a estrutura ao carregamento aplicado. Uma fração igual a 25% do volume inicial foi adotada conjuntamente com um raio de sensibilidade igual a 2. O parâmetro de penalização p foi tomado igual a 3. A geometria do consolo foi definida por uma malha com 50x50 elementos. Foram tomados também um módulo de elasticidade do material igual a 2.08 GPa e um coeficiente de Poisson igual a 0.15. Para o processo de otimização dos modelos foram considerados elementos de treliça conforme proposto por Kwak e Noh (2006) e como caso de carregamento a consideração de múltiplos carregamentos atuantes conforme mostrada por Bendsøe e Sigmund (2004).

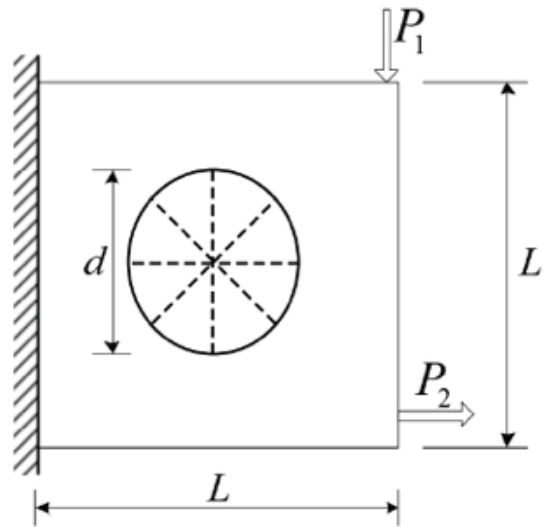


Figura 5
Geometria, cargas e condições de contorno do modelo 1.
Fonte: autor (2011)

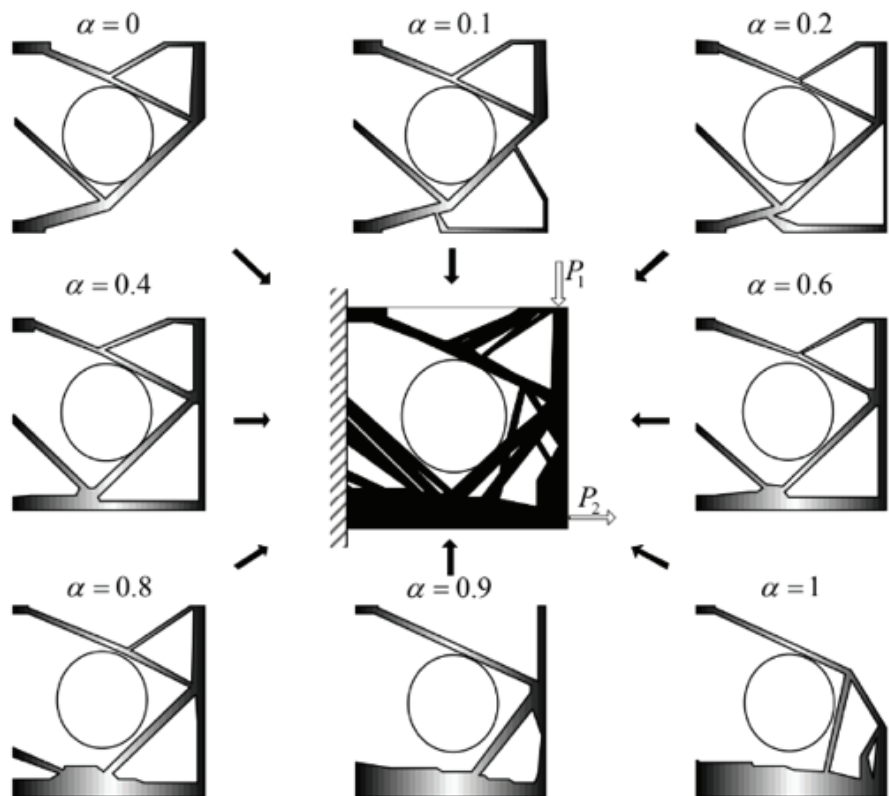
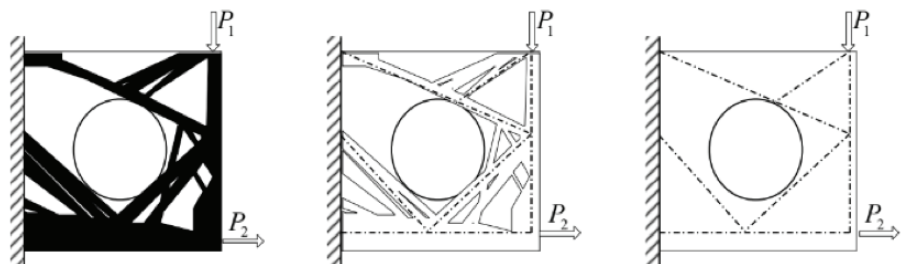


Figura 6
Topologias geradas pelos pontos de Pareto do modelo 1.
Fonte: autor (2011)

A Figura 6 mostra as topologias obtidas para cada par de carregamentos entre P1 e P2 (superfície de Pareto). Cada um dos modelos topológicos obtidos representa um fluxo de forças que transfere o carregamento até o apoio. A influência da intensidade de cada uma das forças pode ser observada na mudança da topologia do modelo. O fator a representa o coeficiente da combinação linear entre cargas. Ao centro a envoltória topológica de Pareto para a estrutura do consolo é mostrada. Fica claro ser impossível cumprir com um único modelo topológico todas as possíveis combinações de carga.

Figura 7
Envoltória topológica de Pareto e modelo de bielas e tirantes do modelo 1.
Fonte: autor (2011)



Uma vez obtida a envoltória topológica de Pareto é possível então propor um modelo generalizado que seja capaz de cumprir um encaminhamento ótimo independentemente da combinação de carga entre P1 e P2. Na Figura (7) é possível ver como a concepção do modelo topológico final é feita. A envoltória topológica de Pareto corresponde, na verdade, a uma região viável otimizada.

5.2 Viga parede com balanço e com furo no centro

O segundo exemplo corresponde a uma estrutura de viga parede com um balanço e um buraco na sua região central. Dois carregamentos atuantes P1 e P2 são aplicados na parte superior da viga conforme mostra a Figura 8. Um furo com diâmetro igual a $d = L/4$ foi considerado de forma centralizada na estrutura. Um apoio de segundo gênero foi considerado no lado esquerdo da viga parede e um de primeiro gênero no lado direito de modo a estabilizar a estrutura ao carregamento aplicado. Uma fração igual a 25% do volume inicial e um raio de sensibilidade igual a 2 também foram considerados. Foi adotado um parâmetro de penalização p igual a 3. A malha da viga foi de 100x50 elementos. Similarmente ao exemplo 1, um módulo de elasticidade do material igual a 2.08 GPa e um coeficiente de Poisson igual a 0.15 foram adotados. Elementos de treliça e o caso de carregamentos múltiplos foram utilizados.

As diferenças topológicas apresentadas em cada caso de carregamento podem ser vista na Figura 9. O fluxo de forças fica realmente modificado à medida que a variação relativa entre forças

é modificada. O conjunto de topologias, similarmente ao modelo 1, é utilizado para compor a envoltória topológica de Pareto. Um modelo completo que apresente uma quantidade necessária de barras deve ser posta dentro da região viável da envoltória topológica de Pareto. É possível observar a necessidade de um conjunto de barras internas (Fig. 9) que possam distribuir o encaminhamento de modo razoável até os apoios. Isso não é possível de ser observado sem a consideração da metodologia de otimização multiobjetivo com uso da superfície de Pareto.

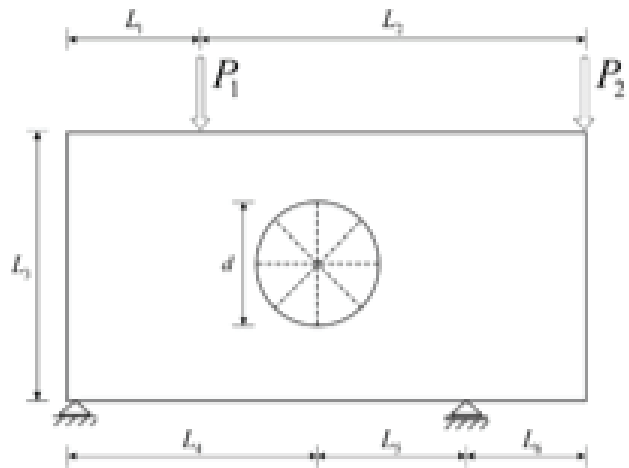


Figura 8
:Geometria, cargas e condições de contorno do modelo 2.
Fonte: autor (2011)

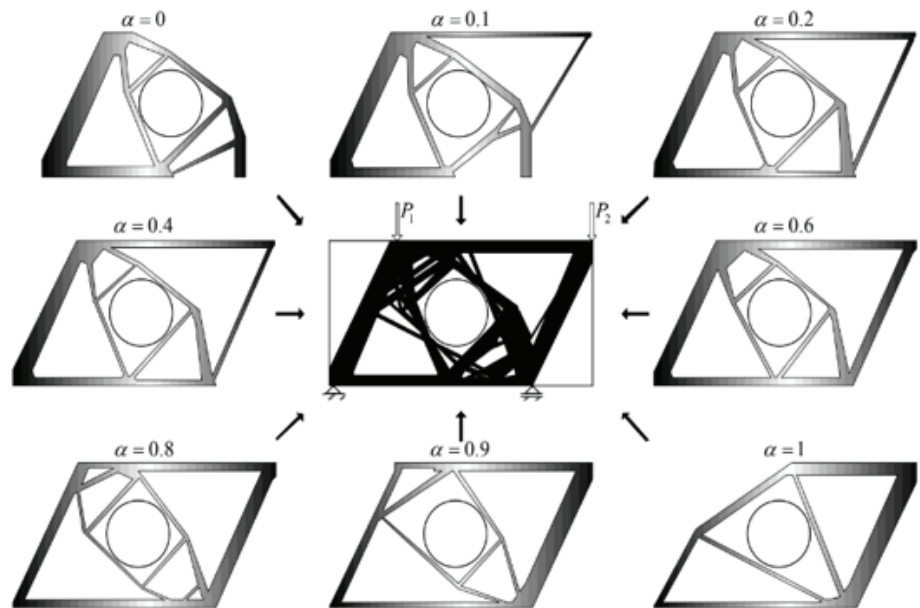
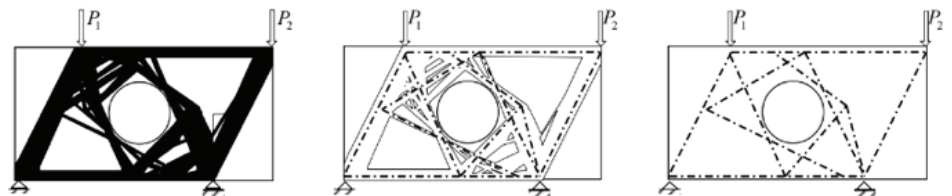


Figura 9
Topologias geradas pelos pontos de Pareto do modelo 2.
Fonte: autor (2011)

Novamente, obtida a envoltória de Pareto é possível o lançamento da treliça ótima no interior da envoltória. Uma treliça que atenda ao carregamento aplicado é mostrada na Figura 10.

As barras lançadas internamente são responsáveis pelo desvio no fluxo de forças devido à presença do furo no meio da estrutura. Também tirantes tanto na parte inferior como superior serão necessários.

Figura 10
Envoltória topológica de Pareto e modelo de bielas e tirantes do modelo 2.
Fonte: autor (2011)



6 CONCLUSÕES

Uma metodologia para geração automática de modelo de bielas e tirantes utilizando um algoritmo de otimização topológica conjuntamente com técnicas de otimização multiobjetiva é introduzida nesse trabalho. Os exemplos numéricos mostram a aplicabilidade da metodologia na determinação de um modelo de bielas e tirantes ótimo que satisfaça os diversos casos de carregamentos envolvidos no problema. Claramente, o acoplamento dessa metodologia no projeto de estruturas de concreto via modelo de bielas e tirantes mostrou ser uma técnica viável para aplicações em projeto. O presente método se mostrou eficaz e possibilita um tratamento bastante prático e direto na geração automática de topologias do modelo de bielas e tirantes em estruturas de concreto armado.

7 REFERÊNCIAS

- ALI, M.A. AND WHITE, R.N.**, *Automatic generation of truss model of optimal design of reinforced concrete structures*, ACI Struct. J., Vol. 98(4), 431-442, 2001.
- ARORA, J.S.** *Optimization of Structural and Mechanical Systems*. World Scientific. 2006. **BENDSØE, M.P. AND KIKUCHI, N.**, *Generating Optimal Topologies in Optimal Design using a Homogenization Method*, Comput. Methods Appl. Mech. Eng., Vol. 71, 197~224. 1988
- BENDSØE, M. P. AND SIGMUND, O.**, *Topology Optimization: Theory, Methods and Applications*, Springer Verlag, Berlin Heidelberg., 2004.
- BIONDINI, F. AND BONTEMPI, F. AND MALERBA, P.G.**, *Stress path adapting strut-and-tie models in cracked and uncracked R.C. elements*, Struct. Eng. Mech., Vol. 12(6), 685-698., 2001.
- IBAÑEZ, S. H.** *Metodos de Diseño Optimo de Estructuras. Coleccion Señor*, N. 8, Paraninfo S.A., 1990.
- KWAK, H.G. AND NOH, S.H.**, *Determination of Strut-and-Tie Models using Evolutionary Structural Optimization*, Korean Society of Civil Engineers, Vol. 23(1), 1-11., 2003.
- LIANG, Q.Q., XIE, Y.M. AND STEVEN, G.P.**, *Topology optimization of strut-and-tie models in reinforced concrete structures using an evolutionary procedure*. ACI J., Vol. 97(2), 322- 330., 2000.
- SCHLAICH, J., SCHAEFER, K. AND JENNEWEIN, M.**, *Toward a consistent design of structural concrete*. PCI J., Vol. 32(3), 75-105, 1987.
- SILVA, R. C. E GIONGO, J. S.** *Modelos de Bielas e Tirantes Aplicados a Estruturas de Concreto Armado*. Livro. Editora EESC-USP. São Carlos/SP. 2000.
- SOUZA, R. A.**, *Concreto Estrutural: análise e dimensionamento de elementos com descontinuidades. Tese de doutorado*. USP – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia e Fundações. São Paulo/SP. 2004
- XIE, Y.M. AND STEVEN, G.P.** *A simple evolutionary procedure for structural optimization*, Comput. Struct., Vol. 49(5), 885~896. 1993.



ISBN: 978-65-84854-12-3

QRL



9 786584 854123