

Otimização topológica de sistema de contraventamento em edifícios altos

Topology optimization of bracing systems for high-rise buildings

Rayanne Expedita Lopes Pereira^a, Gustavo Bono^{a*},
Giuliana Furtado Franca Bono^a

^a Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Centro Acadêmico do Agreste, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGECAM). Caruaru-PE, Brasil.

*E-mail: bonogustavo@gmail.com

Palavras-chave:

Otimização Topológica, norma NBR 6123/1988, sistemas de contraventamento, edifícios altos.

Keywords:

Topological optimization, standard NBR 6123, bracing system, tall building.

Resumo

Atualmente, os centros urbanos das cidades brasileiras apresentam-se cada vez mais verticalizados, portanto, os arquitetos e engenheiros precisam de ferramentas eficientes para analisar os efeitos do vento sobre as edificações. Tendo em vista o amadurecimento das ferramentas de simulação numéricas, bem como o avanço dos computadores, a Otimização Topológica (OT) apresenta-se como uma eficiente ferramenta para a determinação de sistemas de contraventamento para edifícios altos. No presente trabalho, para obter as cargas do vento que atuam no edifício, adota-se a norma NBR 6123/1988 – Forças devido ao vento em edificações. Foram considerados quatro carregamentos distintos, cargas em uma ou duas faces do edifício e cargas em todos os pavimentos ou cada três pavimentos. Para a resolução do problema bidimensional de OT empregam-se os métodos SIMP e BESO. Observou-se, que as estruturas otimizadas com o método BESO obtiveram estruturas menos flexíveis, no entanto o método SIMP demandou maior tempo de processamento em comparação com o método BESO. Quanto ao tipo de carregamento, percebeu-se que as estruturas obtidas com carregamentos aplicados em todos os andares possuem maior rigidez.

Abstract

The urban center of Brazilian cities is becoming more and more vertical, therefore architects and engineers need efficient tools when analyzing the wind action on buildings. The development of numerical simulation and the increase of computational capacity have contributed to the development of optimization tools such as topological optimization (TO), which can be used efficiently in the design of bracing systems for high-rise buildings. In this paper, the Brazilian wind standard NBR 6123 was used to find the wind

loads acting on a tall building. Four load scenarios were considered. For the solution of the bi-dimensional TO problem, two different methods were applied: the SIMP method and the BESO method. The optimized structures obtained with the BESO method were less flexible. Also, this method was more efficient when considering computational cost. Moreover, it was observed that the structures obtained from the load scenario which considered the loads applied to each floor level presented the higher stiffness.

1 Introdução

Edificações em geral são expostas às forças dos ventos, sendo essas de caráter dinâmico, possuindo, portanto, crescente necessidade de ser quantificada, haja vista que os efeitos induzidos pelo vento sobre os sistemas estruturais se apresentam como fatores de risco à estabilidade das edificações, podendo provocar acidentes ou danos.

No cenário dos edifícios altos, a necessidade de reduzir custos e materiais torna-se inevitável, havendo desta forma a necessidade dos arquitetos e engenheiros desenvolverem metodologias para conceber melhores projetos. Como alternativa, pode-se destacar o uso de técnicas de otimização, haja vista que o processo de otimização estrutural consiste em obter o projeto do sistema estrutural de melhor desempenho.

Desse modo, o presente trabalho visa, através do emprego da Otimização Topológica (*OT*), em conjunto com a norma brasileira NBR 6123/1988, otimizar o sistema estrutural de contraventamento do edifício padrão CAARC. No estudo, consideram-se quatro carregamentos produzidos pelo vento conforme a norma brasileira NBR 6123 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988) nas direções 0° e 90°. Para a *OT* bidimensional foram empregados os métodos *Solid Isotropic Material with Penalization (SIMP)* e *Bi-Directional Evolutionary Structural Optimization (BESO)*.

2 Fundamentação teórica

De acordo com Xie, Felicetti e Tang (2014), o processo de otimização estrutural consiste em obter o projeto de melhor desempenho, ou seja, encontrar o ótimo, tornando essa busca única. Desse modo, o resultado obtido através da otimização estrutural torna-se independente do profissional.

O principal objetivo da *OT* é a busca pelo leiaute ou topologia de uma quantidade fixa de material que satisfaça determinados conjuntos de restrições do projeto estrutural, minimizando ou maximizando a função objetivo, sendo definida a função objetivo a partir do conjunto de variáveis de projeto que descrevem o sistema estrutural.

Dentre as principais técnicas de OT, os métodos *SIMP* e *BESO*, destacam-se por sua ampla difusão na área acadêmica e industrial. O método *SIMP* foi descrito pela primeira vez por Bendsoe (1989), sob o nome abordagem direta, ou densidade artificial, e o termo *SIMP* foi introduzido pelos autores Rozvany, Zhou e Birker (1992). Nesse método, a existência ou não de material é tratada através do uso de um modelo de material fictício, em que as regiões possuem valores de densidades, variando entre os limites de 0 e 1, configurando o material vazio e sólido, respectivamente. Deste modo, ao utilizar a técnica denominada *SIMP*, o comportamento constitutivo do material intermediário (artificial) é definido por uma função paramétrica p , associada com a densidade do material. Desta forma, a densidade associada a cada ponto do domínio é utilizada para a determinação do tensor constitutivo do material, conforme pode ser visto com mais detalhes em Bendsoe e Sigmund (1999; 2003).

A definição formal do problema de otimização pode ser apresentada como:

$$\text{minimizar } C(\mathbf{x}) = \mathbf{u}^T \mathbf{K} \mathbf{u} = \sum_{e=1}^N (x_e)^p \mathbf{u}_e^T \mathbf{K}_0 \mathbf{u}_e \quad (1)$$

$$\text{sujeito a } \frac{V(x)}{V_T} = f_v \quad (2)$$

$$\mathbf{K} \mathbf{u} = \mathbf{f} \quad (3)$$

$$0 < x_{min} \leq x_e \leq 1 \quad (4)$$

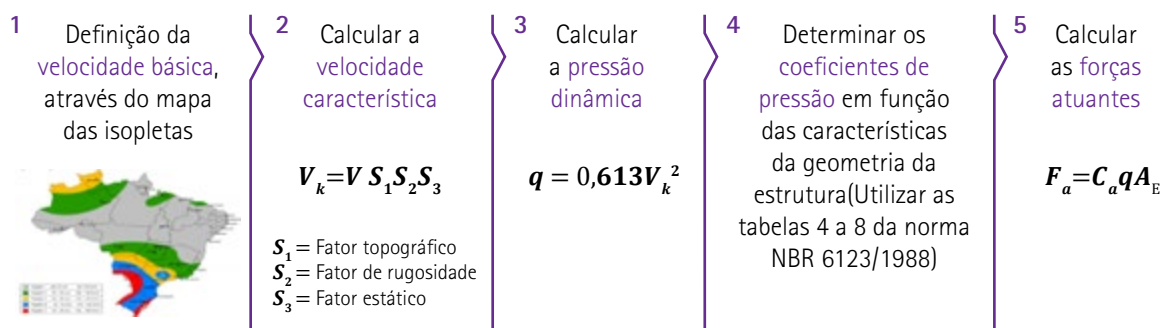
onde, $C(\mathbf{x})$ é a flexibilidade, \mathbf{u} é o vetor de deslocamentos, \mathbf{K} é a matriz de rigidez, (x_e) é a densidade do elemento, \mathbf{u}_e é o vetor de deslocamento do elemento, $\mathbf{K} \mathbf{u}$ é a matriz de rigidez do elemento, $V(x)$ é o volume, V_T é o volume total de domínio, f_v é a fração de volume, \mathbf{f} é o vetor de carga e x_{min} é o valor de densidades relativas mínimas.

O método de otimização estrutural evolucionária *BESO*, baseia-se em métodos heurísticos em que é selecionada certa quantidade de material a ser removido ou adicionado gradualmente (HUANG; XIE, 2010). O método foi desenvolvido a partir da metodologia proposta por Xie e Steven (1996) e conhecida como *Evolutionary Structural Optimization (ESO)*. No método *BESO*, a estrutura é otimizada removendo e adicionando elementos, ou seja, o elemento em si, ao invés de ser associado a parâmetros físicos, é tratado como a variável de projeto. O problema de OT com restrição de volume no método *BESO*, é similar ao apresentado nas **Equações (1) até (3)**, no entanto, as variáveis não assumem valores intermediários dentro do intervalo [0,1]. Para o método *BESO*, empregam-se variáveis de carácter discreto, admitindo apenas os valores 0 e 1, configurando o material sólido e vazio, respectivamente.

O principal objetivo do sistema de contraventamento é aumentar a rigidez das estruturas, permitindo-a resistir às ações horizontais, sendo os grandes responsáveis pela segurança das estruturas de edifícios altos. Conforme Franca (2003), o sistema de contraventamento permite que as estruturas possuam um comportamento mais eficiente em relação às estruturas puramente aporricadas, isso ocorre, em decorrência da eliminação dos momentos de ligações entre vigas e colunas. Ao inserir barras diagonais no interior dos quadros aporricados é possível fazer a eliminação desses momentos. Dessa forma, os esforços devido à carga lateral são absorvidos principalmente pelas diagonais e não mais pelas vigas. Assim, todos os elementos que formam esse treliçamento praticamente ficam sujeitos apenas a esforços axiais, o que torna este sistema estrutural muito eficiente. O melhor desempenho pode ser justificado pelo fato das barras trabalharem predominantemente sob esforços axiais de tração e compressão, resultando em estruturas mais rígidas às cargas laterais.

As cargas devido ao vento para efeitos de cálculo na edificação podem ser determinadas pela norma NBR 6123 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988), cujo objetivo é fixar as condições exigíveis na consideração das cargas provocadas sobre as estruturas devido às ações estática e dinâmica do vento. Na **Figura 1**, mostra-se um fluxograma com o procedimento de cálculo conforme definido na norma NBR 6123/1988.

Figura 1 - Fluxograma para obtenção de cargas com a NBR 6123/1988



Fonte: elaborado pelos autores de acordo com a norma NBR 6123 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (1988)

3 Metodologia

Para o presente trabalho, foi desenvolvido um código implementado no ambiente MATLAB, empregando-se o Método dos Elementos Finitos para a discretização do domínio e os métodos de *OT*, *SIMP* e *BESO*, para problemas em Elasticidade Linear bidimensional. O código foi desenvolvido tomando-se como base os programas implementados para o critério de otimização *OC* (*Optimality Criteria*) por Andreassen et al. (2011) e Huang e Xie (2010), respectivamente. No código, foram implementados para o método *SIMP* os solvers baseados nos métodos de aproximação sequencial (*SAO - Sequential Approximate Optimization*) de sub-problemas: (1) o *SAO-Dual* (*Approximate Sub-problem in Dual form*), (2) o *SAO-QP* (*Approximate Sub-problem in Quadratic Program form*) e (3) o Método das Assíntotas Móveis (*MMA - Method of Moving Asymptotes*). Para os métodos de interpolação, foram utilizados a aproximação *RAMP* (*Rational Approximation of Material Properties*) e *ModSIMP* (*Modifed Solid Isotropic Material with Penalization*).

Com o intuito de melhorar o desempenho computacional do método *BESO* original (HUANG; XIE, 2010), foram realizadas as mesmas modificações empregadas por Andreassen et al. (2011). Para mais detalhes com relação às implementações no código desenvolvido, ver Pereira (2018).

Para a otimização bidimensional dos sistemas de contraventamento considerando os efeitos do vento, adota-se o edifício padrão do Commonwealth Advisory Aeronautical Research - CAARC (MELBOURNE, 1980), que tem sido uma referência recorrente em diversas pesquisas na área da Engenharia do Vento. O edifício CAARC é um prisma retangular de 61 pavimentos com as seguintes características, base de 30,48 m por 45,72 m e altura 183,88 m.

Os carregamentos foram obtidos mediante a norma NBR 6123/1988, considerando a edificação localizada na cidade de Caruaru (PE). Para o estudo consideram-se os seguintes valores dos parâmetros: velocidade básica (V_0) de 30 m/s, o fator topográfico é = 1, o fator estático é = 1 e o fator de rugosidade define-se como categoria IV e classe C.

No estudo, consideram-se quatro casos de distribuição de cargas, conforme mostrado na **Tabela 1**. Os coeficientes de arrasto necessários para o cálculo das forças, determinam-se considerando o caso de baixa turbulência, e são iguais a 1,25 e 1,45, para os ângulos de incidência 0° e 90°, respectivamente. Através dos dados fornecidos anteriormente, é possível obter o carregamento devido ao vento utilizando a norma NBR 6123/1988, conforme visto na **Figura 1**.

Tabela 1 – Casos utilizados para distribuição de cargas

CASO 1 - Carregamento nas duas faces e em todos os andares, ou seja, a cada 3 m	CASO 3 - Carregamento em todas as faces, aplicada cada 3 andares
CASO 2 - Carregamento em uma única face (frontal), em todos os andares	CASO 4 - Carregamento em uma face (frontal) e a cada 3 andares

Fonte: elaborado pelos autores

4 Validações

Na **Figura 2**, apresentam-se as soluções e os principais parâmetros (número de iterações, valor da função objetivo e tempo adimensional) obtidos com o programa desenvolvido para os métodos *SIMP* e *BESO* considerando o problema clássico da viga biapoada com carga no centro (viga MBB). Também, mostram-se na figura os resultados obtidos por outros autores. Devido à simetria do problema, resolve-se a metade do domínio, ou seja, uma relação comprimento/altura = 3/1. Utilizou-se para o caso *SIMP*, os métodos *ModSIMP* e OC, como métodos de interpolação e atualização das variáveis respectivamente. Para o método *BESO*, a atualização das variáveis deu-se em função do método OC.

Figura 2 – Análise comparativa da solução no caso da viga MBB com os métodos *SIMP* e *BESO*

Parâmetros	Método	Autor	Resultado	Iteração	F.O	Tempo (adimensional)
Malha = 120X40 $r_{min} = 3$	<i>SIMP</i>	Nobel - Jorgensen e Baerentzen (2015)		-	-	-
	<i>SIMP</i>	Autor		100	207,04	2,33
	<i>BESO</i>	Autor		46	186,46	1
Malha = 150X50 $r_{min} = 4$	<i>SIMP</i>	Van de Vem (2014)		-	208,76	-
	<i>SIMP</i>	Autor		94	208,66	1,77
	<i>BESO</i>	Autor		42	188,26	1,41
Malha = 300X100 $r_{min} = 16$	<i>SIMP</i>	Andreassen et al. (2011)		-	222,29	-
	<i>SIMP</i>	Autor		95	246,05	7,96
	<i>BESO</i>	Autor		42	195,88	5,75

Fonte: elaborado pelos autores

Para o exemplo, foram utilizados os seguintes valores nos coeficientes e parâmetros: o coeficiente Poisson é 0,3, o fator de penalização é 3, a fração de volume é 0,5, o módulo de elasticidade é 1, o filtro de sensibilidades (*rmin*) adota-se conforme o refinamento da malha, o critério de parada é 0,01 e a tolerância necessária para determinar os limites das variáveis em cada iteração é 0,2.

Deve-se ressaltar que as alterações realizadas no método *BESO* original (HUANG; XIE, 2010), melhoraram consideravelmente o tempo de processamento, haja visto que, a utilização do código original necessitou de aproximadamente 38 vezes mais de tempo de processamento em comparação com o código implementado para uma viga com uma discretização de 150 x 50.

Analisando os resultados obtidos, pode-se concluir que os mesmos estão em conformidade com as soluções encontradas na literatura. Observa-se, que o método *BESO* sempre apresentou-se os menores valores da função objetivo em comparação com o método *SIMP* independentemente da discretização empregada. A diferença entre os valores pode ocorrer em virtude da energia de tensão superestimada para os elementos com densidades intermediárias na topologia obtida pelo método *SIMP* (HUANG; XIE, 2010). Através dos resultados apresentados na **Figura 2**, percebe-se que o método *BESO* obteve convergência com menor número de iterações, conseqüentemente, menor tempo de processamento para todo os casos avaliados.

5 Resultados e discussão

Na **Figura 3**, mostram-se as estruturas de contraventamento obtidas nas duas faces do CAARC considerando os métodos de *OT*, *SIMP* e *BESO*, para os dois casos com carregamentos em todos os andares (caso 1 e caso 2) e ângulos de incidências do vento igual a 0° e 90°. Também, apresentam-se os valores da função objetivo, número de iterações e tempo de processamento adimensional.

As estruturas otimizadas, nos casos de carregamento cada 3 andares (casos 3 e 4) para os dois ângulos de incidência do vento e ambos métodos de *OT*, apresentam-se na **Figura 4**.

Figura 3 – Resultado da *OT* com cargas em todos os andares para os métodos *SIMP* e *BESO*

Carregamento em todos os andares

	Direção 0°				Direção 90°			
	<i>BESO</i>		<i>SIMP</i>		<i>BESO</i>		<i>SIMP</i>	
	Caso 1	Caso 2	Caso 1	Caso 2	Caso 1	Caso 2	Caso 1	Caso 2
F.Obj (10 ⁶ kNm)	793,86	367,62	835,6	391,01	90,61	42,61	99,78	45,28
Iter.	46	40	260	157	40	45	219	218
Tempo (adimensional)	1,51	1	10,4	3,55	2,65	1,25	12,85	5,9

Fonte: elaborado pelos autores

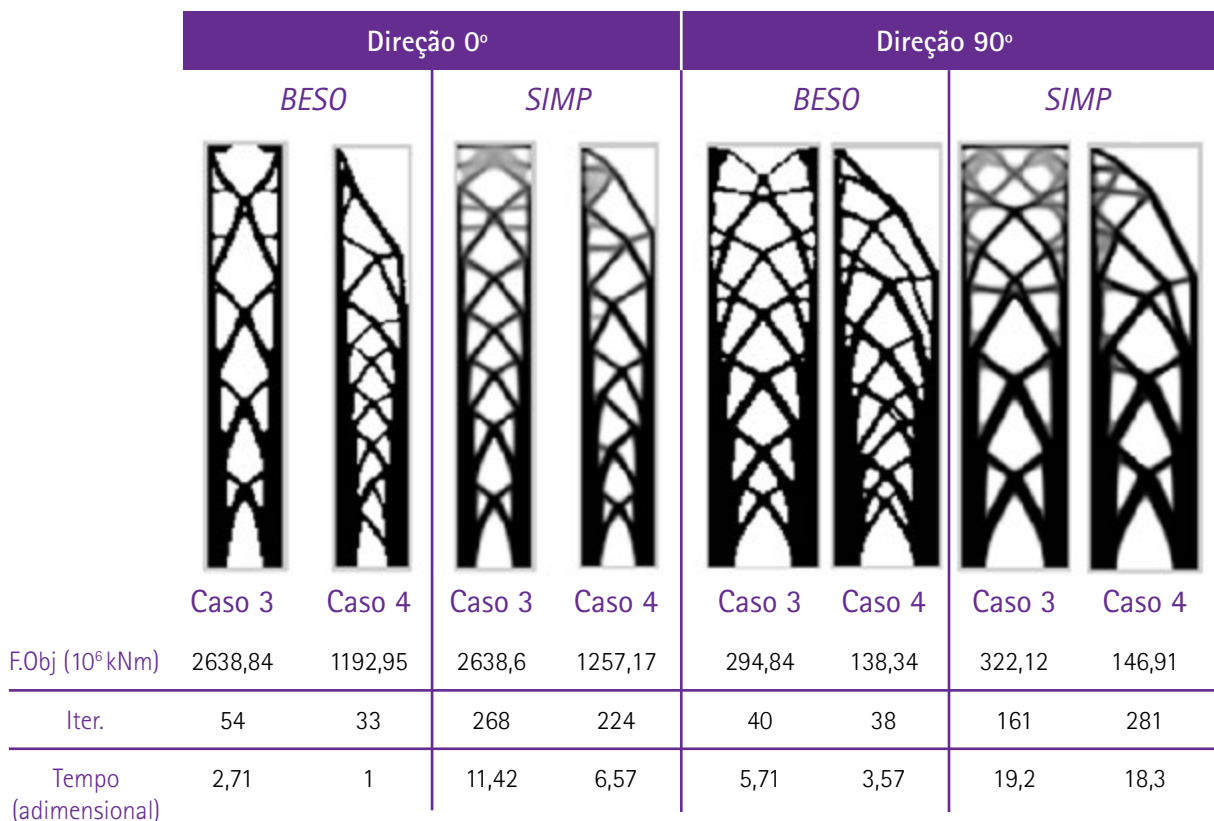
Comparando os resultados entre os dois tipos de carregamento, observa-se que as estruturas cujos carregamentos foram aplicados a cada 3 andares, apresentaram um maior valor de flexibilidade em comparação aos resultados com carregamento em todos os andares (casos 1 e 2). Isso ocorre, em virtude dos maiores valores das cargas nos casos 3 e 4.

Analisando os valores da *FO* com relação aos métodos de *OT*, verifica-se que sempre o método *BESO* apresenta menor valor de flexibilidade em comparação com as estruturas obtidas com o método *SIMP*, independentemente do ângulo de incidência do vento. No método *SIMP*, os elementos com densidades intermediárias contribui com o aumento da flexibilidade e, portanto, com a redução da rigidez da estrutura.

Comparando os métodos *SIMP* e *BESO*, pode-se concluir que o método *BESO*, obteve resultados livres de escala de cinza, uma vez que esse método não possui densidades intermediárias, portanto, os resultados desse método são facilmente interpretados. Em contrapartida, nas estruturas otimizadas com o método *SIMP* existem amplas regiões com escala de cinza, principalmente na parte superiores das estruturas.

Figura 4. Resultado da *OT* com cargas a cada 3 andares para os métodos *SIMP* e *BESO*

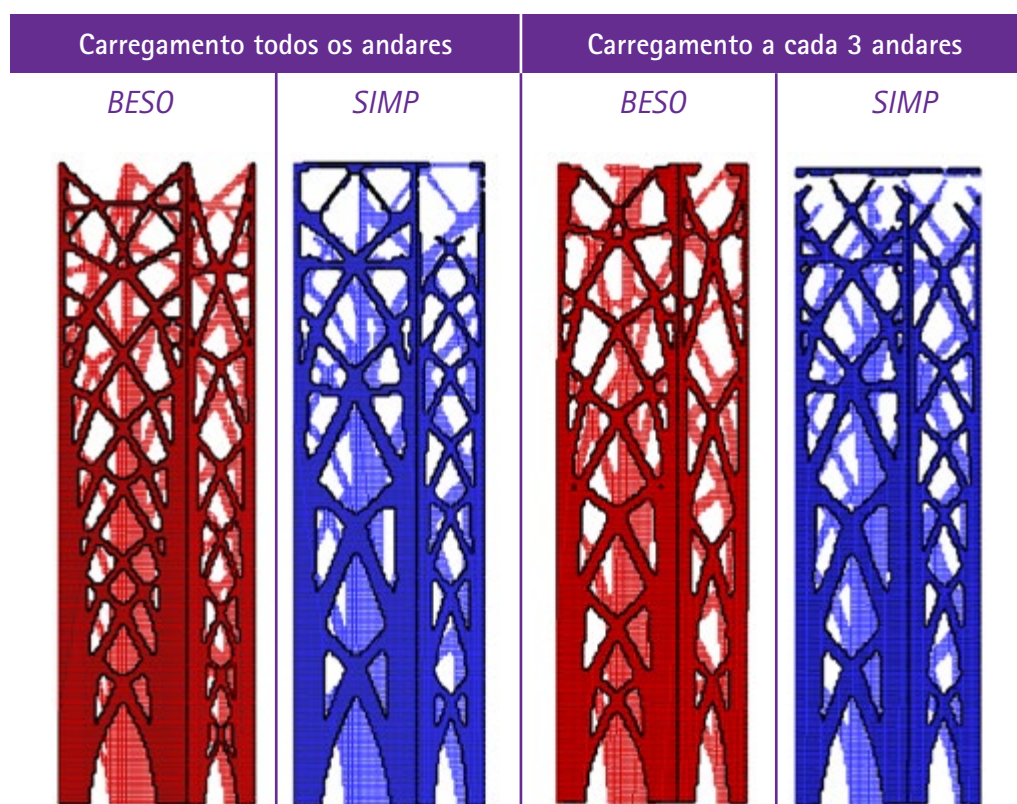
Carregamento a cada 3 andares



Fonte: elaborado pelos autores

Na **Figura 5**, mostram-se as estruturas de contraventamento 3D obtidas a partir das otimizações topológicas 2D mostradas na **Figura 4**. No caso do método *SIMP*, considera-se como material sólidos os elementos com densidades superiores a 0,50, conforme empregado por Liu e Tovar (2014).

Figura 5 – Estruturas de contraventamento no CAARC para os métodos *SIMP* e *BESO*



Fonte: elaborado pelos autores

6 Conclusões

No presente trabalho, estudou-se a otimização bidimensional de sistemas de contraventamento de edifícios altos através dos métodos de Otimização Topológica, *SIMP* e *BESO*, considerando os efeitos do vento. Para tal análise, as cargas devido ao vento no edifício padrão CAARC foram determinadas através da norma brasileira NBR6123/1988.

Observou-se, que as estruturas obtidas com carregamentos aplicados em todos os andares obtiveram maior rigidez em comparação com os sistemas de contraventamento com cargas a cada três andares, independentemente do ângulo de incidência do vento. Com relação aos métodos *SIMP* e *BESO*, percebeu-se que o método *SIMP* empregou maior número de iterações e, portanto, maior tempo de processamento em comparação com o método *BESO*, porém, avaliando o valor da função objetivo, ou seja, a flexibilidade, observou-se que o método *BESO* sempre obteve estruturas menos flexíveis.

Trabalhos futuros pretendem estender, a partir do embasamento teórico aqui apresentado, o estudo de sistemas de contraventamento tridimensionais em edificações reais.

7 Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer à Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo auxílio financeiro recebido durante a realização deste trabalho.

8 Referências

ANDREASSEN, E.; SIGMUND, O.; CLAUSEN, A.; SCHEVENELS, M.; LAZAROV, B. S. Efficient topology optimization in MATLAB using 88 lines of code. **Structural and Multidisciplinary Optimization**, v. 43, n. 1, p. 1-16, Jan. 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6123**: Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 1988.

BENDSOE, M. P. Optimal shape design as a material distribution problem. **Structural Optimization**, v. 1, n. 4, p. 193-202, 1989.

BENDSOE, M. P.; SIGMUND, O. **Topology optimization – theory, methods and applications**. New York: Springer, 2003.

BENDSOE, M. P.; SIGMUND, O. Material interpolation schemes in topology optimization. **Archive of Applied Mechanics**, v. 69, n. 9-10, p. 635-654, Nov. 1999.

FRANCA, M. P. A. **Estudo da eficiência dos contraventamentos treliçados em edifícios com estrutura de aço**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2003.

HUANG, X.; XIE, Y. M. **Evolutionary topology optimization of continuum structures**. New Delhi, India: Wiley, 2010.

LIU, K.; TOVAR, A. An efficient 3D topology optimization code written in Matlab. **Structural and Multidisciplinary Optimization**, v.50, n. 6, p. 1175-1196, Dec. 2014.

MELBOURNE, W. H. Comparison of measurements on the CAARC standard tall building model in simulated model wind flows. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 6, n. 1-2, p. 73 – 88, July 1980.

PEREIRA, R. E. L. **Otimização topológica de sistema de contraventamento em edificações, considerando os efeitos do vento**. 2018. Dissertação (Mestrado Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018.

ROZVANY, G. I. N.; ZHOU, M.; BIRKER, T. Generalized shape optimization without homogenization. **Structural Optimization**, v. 4, n. 3-4, p. 250-252, Sept. 1992.

XIE, Y. M.; FELICETTI, P.; TANG, J. Conceptual design of building structures subjected to wind load by using topology optimization. **Wind and Structures**, v. 18, n. 1, p. 21-35, Jan. 2014.

XIE, Y. M.; STEVEN, G. P. Evolutionary structural optimization for dynamic problems. **Computers & Structures**, v. 58, n. 6, p. 1067-1073, 1996.