



OTIMIZAÇÃO DE TORRES EÓLICAS DE CONCRETO ARMADO

OPTIMIZATION OF REINFORCED CONCRETE WIND TOWERS

Thays Guerra Araújo (1); Antônio Macário Cartaxo de Melo (2); Tereza Denyse Pereira de Araújo (3)

(1) Engenheira Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza - CE, Brasil.

(2) Dr. Prof., Universidade Federal do Ceará, Fortaleza - CE, Brasil.

(3) Dra. Profa., Universidade Federal do Ceará, Fortaleza - CE, Brasil

Email para Correspondência: thaysgaraujo@gmail.com; (P) Apresentador

Resumo: As torres eólicas de concreto com alturas acima de 100 m têm se apresentado como uma solução mais vantajosa em comparação às torres metálicas. O dimensionamento eficiente dessas torres é importante para garantir a sua viabilidade e o uso de técnicas de otimização pode auxiliar na redução dos seus custos e na automação do processo de projeto. Uma formulação de um modelo de otimização de custo de torres eólicas de concreto armado, considerando as parcelas de concreto e aço, é apresentada. A análise é feita por elementos finitos e são investigadas estratégias simplificadas para o tratamento das não-linearidades física e da modelagem dinâmica do vento, visando uma maior eficiência da otimização. Na análise da torre, são avaliadas as condições de carregamento e recomendações da NBR 6118 e IEC 61400-1. As variáveis de projeto são relacionadas as dimensões características da seção tubular da torre e as armaduras longitudinais, todas tratadas como natureza discreta. As restrições são relativas a parâmetros da geometria, ao critério de resistência no ELU, à deformação excessiva no ELS, à frequência natural da torre e as taxas mínimas e máximas de armadura longitudinal. A resistência é tratada considerando a curva aproximada de interação M-N dos esforços resistentes nos estados limites. O modelo de otimização é resolvido com algoritmos genéticos e aplicações são feitas a torres com 100 m de altura. Soluções preliminares otimizadas para a torre eólica são obtidas de forma eficiente auxiliando a fase de dimensionamento dessas estruturas. Os resultados são comparados com problemas encontrados na literatura.

Palavras chaves: otimização; torre; eólica; concreto; algoritmos genéticos.

Abstract: Concrete wind towers over 100 m height have been presented as a more appropriated solution comparing to steel towers. The efficient design of these structures is important to ensure their feasibility and the use of optimization techniques can help reduce the costs and automate the design process. This paper presents a cost optimization model for reinforced concrete wind towers, considering concrete and reinforcement. Finite element analysis is conducted, and simplified strategies are investigated considering physical nonlinearity and dynamic wind modeling for a more efficient optimization. The loading conditions and recommendations of NBR 6118 and IEC 61400-1 are used for the tower analysis. The design variables are the dimensions of the tubular section of the tower and the longitudinal reinforcement, all treated as discrete. The constraints are related to geometry parameters, the ULS resistance, the excessive deformation in the SLS, the natural frequency of the tower and the longitudinal reinforcement ratio. The reinforced concrete strength is treated considering the approximate M-N interaction diagram of



stresses corresponding to the limit states. The optimization problem is solved by genetic algorithms and applications are made to towers over 100 m. Preliminary optimized solutions were obtained for the wind tower in an efficient manner, assisting the prior design stage of these structures.

Keywords: optimization; wind; tower; concrete; genetic algorithms.

1 INTRODUÇÃO

O interesse no desenvolvimento de fontes energéticas alternativas cresceu consideravelmente nas últimas décadas. Dentre as energias renováveis, a energia eólica é uma das mais promissoras, tendo apresentado uma taxa de crescimento exponencial no Brasil e no mundo (GWEC, 2017). A cada ano, a energia eólica vem ganhando cada vez mais espaço no cenário energético mundial com vultosos investimentos voltados para o desenvolvimento de novas tecnologias.

O aumento significativo na capacidade das turbinas eólicas, que saíram de quilowatts para megawatts, levou à necessidade de torres com maiores alturas para se conseguir ventos com melhores condições e maiores velocidades (Hau, 2013). As torres utilizadas para suportar as turbinas são, na maioria, metálicas e possuem diâmetro máximo de aproximadamente 4,4 m devido a limitações relacionadas ao seu transporte (LaNier, 2005). Entretanto, as estruturas se tornaram cada vez mais altas e mais solicitadas, requerendo diâmetros maiores na base (Hau, 2013). Desse modo, novas soluções foram estudadas, e pesquisas realizadas mostram que as torres eólicas de concreto com alturas acima de 100 m têm se apresentado como uma solução mais vantajosa em comparação às torres metálicas para turbinas multi-megawatts onde alturas maiores são necessárias (Gama, 2015; Hau, 2013; LaNier, 2005).

LaNier (2005) estudou a viabilidade econômica de torres de 100 m de aço, concreto e híbridas, com turbinas de 1,5, 3,6 e 5 MW de potência e verificou que para turbinas maiores, o custo das torres de concreto pré-moldado seria em torno de 63% a 68% menor. Al-Kaimakchi et al. (2017) verificou que torres de concreto podem ser 30% mais baratas e que torres metálicas acima de 80 m não são economicamente competitivas comparando com as torres de concreto e torres híbridas.

O dimensionamento eficiente dessas torres é importante para garantir a viabilidade da energia eólica, as quais podem representar até 30% dos custos totais (Hau, 2013). O uso de técnicas de otimização pode auxiliar na redução dos seus custos e na automação do processo de projeto. Assim, há uma tendência cada vez maior no uso de técnicas de otimização para projeto dessas estruturas.

Ma e Meng (2014) apresentaram um modelo de otimização para uma torre de concreto protendido de seção transversal regular octogonal com nervuras internas em cada lado. Os resultados mostraram que o custo é diminuído em aproximadamente 15% comparando com a torre original de aço. Bai et al. (2017) buscou minimizar o custo da construção de uma torre eólica de 140 m, de concreto pós-tensionado. Em torno de 170 toneladas de concreto foram economizadas, representando aproximadamente 10% do volume total. Silva et al. (2008) apresentou formulações para o projeto ótimo de torres



eólicas de concreto armado considerando o modelo dinâmico discreto da ABNT 6123 para modelagem do vento. Nicholson et al. (2013) desenvolveu um estudo de otimização multi-objetivo não-linear para uma torre eólica híbrida de 130 m e uma torre de aço. O trabalho também levou em consideração a fundação não rígida e a interação do solo com a estrutura.

O número de pesquisas realizadas que aplicam técnicas de otimização para a obtenção de um modelo ótimo de torre eólica cresceu bastante, mas ainda se encontram limitadas por conta de carência de informações e normas de projeto específicas. Sendo assim, o desenvolvimento de modelos de otimização eficientes para torres eólicas de concreto é um grande desafio e podem auxiliar engenheiros nos projetos preliminares dessas estruturas que possuem comportamento complexo.

É imprescindível buscar modelos que representem de forma mais aproximada o comportamento dessas estruturas para se tirar proveito das técnicas de otimização disponíveis. Porém, é importante ressaltar que quanto mais detalhado é o modelo, mais complexa e onerosa será a solução do problema. Uma opção bastante atrativa é o emprego de uma análise simplificada, mas eficiente, com o uso, por exemplo, de elementos de viga ao invés de elementos de casca, onde efeitos de não linearidades e da ação dinâmica do vento possam ser tratados de forma simples (Barroso Filho, 2018).

Esse artigo apresenta a formulação de um modelo de otimização de torres eólicas de concreto armado, com ênfase na modelagem dinâmica da ação do vento proposto pela NBR6123, e o uso de análises estruturais simplificadas. Com a ferramenta a ser desenvolvida, pretende-se suprir a necessidade de realizar projetos de forma mais eficiente e reduzir custos em busca da competitividade da energia eólica, fornecendo ao projetista soluções para um projeto preliminar otimizado de torres eólicas de concreto armado.

2 ANÁLISE

A análise do problema de otimização para torres eólicas de concreto armado foi realizada utilizando o método dos elementos finitos por meio do modelo de vigas implementados no software FAST (Finite Element Analysis Tool) para determinação dos deslocamentos e esforços solicitantes. O modelo de viga é preferível no uso da otimização por tornar mais rápida a análise do problema.

No modelo de elementos finitos, a torre é considerada como sendo engastada na sua base e livre na sua outra extremidade, e é discretizada em n nós e $n-1$ elementos. Devido à variação da geometria da torre ao longo da altura, os parâmetros médios de cada segmento da torre serão utilizados para determinar a rigidez de cada elemento, conforme Figura 1.

Estratégias simplificadas para o tratamento da não-linearidade física (Barroso Filho, 2018) e da modelagem dinâmica do vento conforme a NBR6123 (ABNT, 1988) foram consideradas visando uma maior eficiência da otimização, e serão comentadas mais adiante.

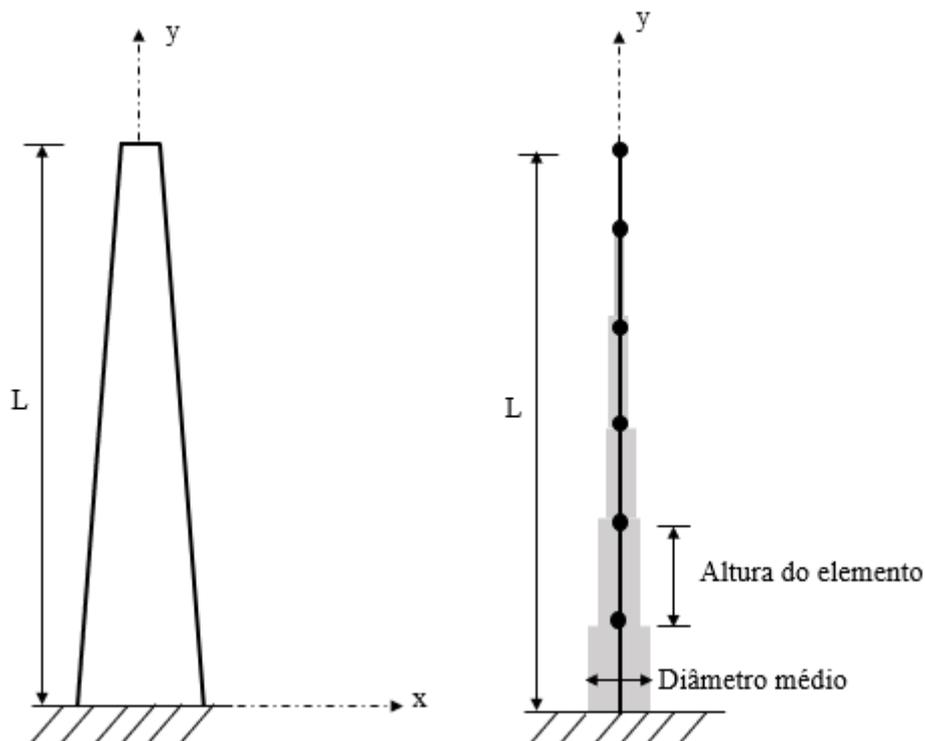


Figura 1 - Discretização da torre eólica em elementos finitos

São avaliadas as condições de carregamento e recomendações da NBR 6118 (ABNT, 2014) e IEC 61400-1. Estratégias para modelagem simplificada de efeitos não lineares serão investigadas tendo como referência o trabalho de Barroso Filho (2018) tais como a consideração da fissuração por meio da redução da rigidez.

Os carregamentos nas quais a torre está sujeita são provenientes das cargas da turbina, peso próprio e a ação direta do vento. As cargas provenientes da turbina são de difícil obtenção devido ao sigilo dessas informações pelos fabricantes. Por essa razão, utilizaram-se as cargas obtidas por um estudo realizado por engenheiros da NREL (National Renewable Energy Laboratory) onde são listadas as características de algumas turbinas estudadas (LaNier, 2005), exibida na Tabela 1. As cargas de turbina são obtidas para dois tipos de condição de vento, EWM a com velocidade de 59,5 m/s e EOG com velocidade de 35 m/s para uma altura do cubo de 100 m (IEC, 2014), conforme Tabela 2.

Tabela 1 - Especificações da turbina utilizada

Potência da Turbina	3,6 MW
Velocidade de rotação do rotor	13.2 rpm (0,22 Hz)
Diâmetro do Rotor	108,4 m
Massa da cabeça (nacele, cubo e pás)	314912 kg
Altura do Cubo	100 m
Classe da IEC	IIB



Tabela 2 - Carregamentos obtidos para EWM e EOG

	Força de Impulsão (kN)	Momento (kNm)	Força axial de compressão (kN)	Torção em torno do eixo longitudinal (kNm)
EWM	1086	16767	3155	5961
EOG	1199	9913	3129	1597
Fadiga	143	2213	-	2220

Para a carga do vento, considerou-se o modelo dinâmico simplificado da NBR 6123 (ABNT, 1988), dado por:

$$q(z) = \bar{q}_0 b^2 \left[\left(\frac{z}{z_r} \right)^{2p} + \left(\frac{h}{z_r} \right)^p \left(\frac{z}{h} \right)^\gamma \frac{1+2\gamma}{1+\gamma+p} \xi \right] \quad (1)$$

Onde

$$\bar{q}_0 = 0,613 \bar{V}_p^2 \quad (2)$$

b e p são coeficientes dados pela norma que varia conforme a categoria do problema, z_r é a altura de referência definida como sendo igual a 10 m, h é a altura total da torre eólica, γ é um parâmetro para a determinação dos efeitos dinâmicos e ξ é o fator de amplificação dinâmica.

A carga de vento divide-se em uma parcela estática, devido à velocidade média do vento, e outra dinâmica, devido à flutuação da velocidade do vento (Silva et al., 2008) e os efeitos dinâmicos são mais intensos em estruturas altas e esbeltas, como é o caso de torres eólicas de concreto.

A maioria das análises realizadas nas torres eólicas consideram o vento como uma carga estática (Al-Kaimakchi et al., 2017; Bai et al., 2017; LaNier, 2005; Lima, 2011). Entretanto, os efeitos dinâmicos provocados pelo vento na torre geram maiores esforços e deslocamentos, em comparação aqueles obtidos pela simples análise estática linear da estrutura (Brasil e Silva, 2016). Além disso, tornam o modelo de análise mais realista, pois a torre eólica é uma estrutura onde a carga de vento tem grande influência no seu dimensionamento. No modelo dinâmico simplificado da NBR 6123 (ABNT, 1988), dado pela Eq. (1) as cargas de vento são dinamicamente amplificadas pelo fator ξ para, então, serem tratadas como estáticas equivalentes. As Figura 2 (a) e (b) exibem o perfil de vento para o modelo dinâmico e modelo estático, respectivamente. É possível verificar que a pressão do vento dinâmico aumenta com maior intensidade, em comparação ao modelo estático.

Para a carga de vento atuante na estrutura, adotou-se uma distribuição do vento dinâmico simplificado, de forma que para cada nó, a força equivalente foi obtida multiplicando-se a pressão atuante no nível do nó pela metade da área de cada elemento adjacente a este nó e pelo coeficiente de arrasto C_a . Para os nós das extremidades,

considerou-se apenas a metade da área do elemento adjacente. O coeficiente de arrasto C_a é obtido através de equações da NBR 6123 (ABNT, 1988).

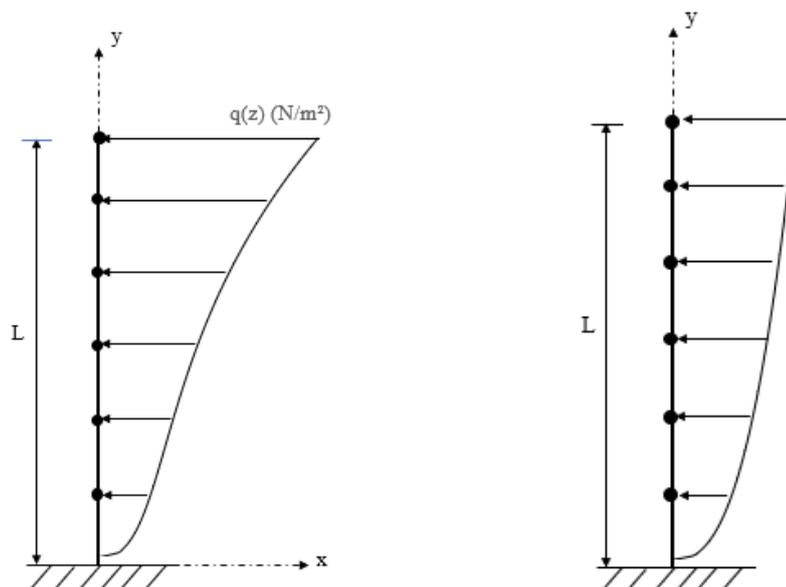


Figura 2 - (a) Perfil do vento dinâmico simplificado (b) Perfil do vento estático

O modelo discreto para determinação das frequências naturais de uma estrutura consiste em concentrar a massa nos nós dos elementos finitos. Esse modelo é sugerido para estruturas que apresentam grandes variações nas suas propriedades geométricas e na sua distribuição de massa. A primeira frequência natural da torre analisada foi obtida pelo software FAST.

A consideração das não-linearidades tanto física quanto geométrica implica em um maior custo computacional, principalmente para estruturas complexas como as torres eólicas e para problemas de otimização. Para modelos de análise de torres mais realistas, esses efeitos devem ser levados em consideração. A torre eólica pode ser considerada um pilar com elevado índice de esbelte, portanto, está sujeita a deslocamentos excessivos e há necessidade de considerar esses efeitos de modo a garantir sua segurança. Esses efeitos podem ser modelados de forma simples, sem exigir grande esforço computacional. Estudos como o de Barroso Filho (2018) têm mostrado que a não-linearidade física pode ser considerada como uma redução na rigidez do material e a geométrica usando o método P- Δ .

3 MODELO DE OTIMIZAÇÃO

O problema de otimização de torres eólicas de concreto armado consiste em minimizar o custo total da torre considerando as parcelas do concreto e do aço utilizados na construção da torre.

Os formatos mais usuais das torres eólicas atualmente são o tronco de cone e o cilíndrico. Para deixar o modelo mais flexível, optou-se por dividir a torre em três segmentos, exibido na Figura 3. O diâmetro externo do topo possui valor fixado pelas dimensões da turbina e do adaptador metálico e é geralmente especificado pelo fabricante. Sendo assim, o segmento do topo possui três variáveis de projeto que são diâmetro inferior externo, espessura e quantidade de armadura longitudinal, e os segmentos restantes possuem quatro variáveis de projeto: diâmetro inferior externo, diâmetro superior externo, espessura e quantidade de armadura longitudinal. A formulação proposta permite que a otimização possa obter torres de formato qualquer, como cilíndrico, tronco de cone, contínuo ou não contínuo, tornando, assim, essa formulação mais geral. Desse modo, tem-se ao todo 11 variáveis de projeto. É importante ressaltar que a quantidade de segmentos nos quais a torre se divide pode variar, alterando assim a quantidade total de variáveis de projeto. Entretanto, visando a viabilidade construtiva da torre, optou-se por formular o modelo com apenas 3 segmentos.

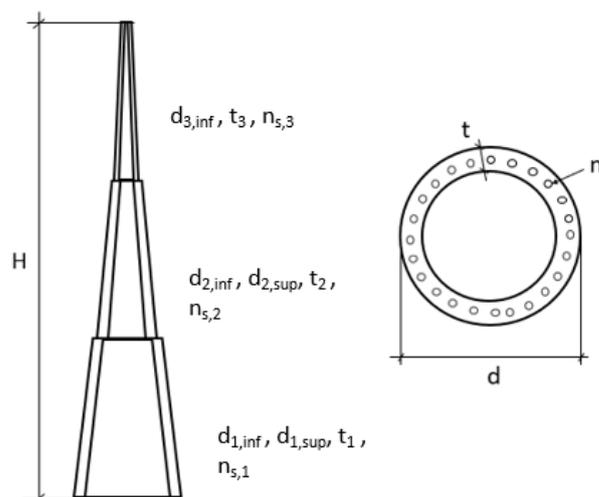


Figura 3 - Esquema da torre eólica e suas variáveis de projeto geométricas. Fonte: Autor

3.1 Função objetivo e variáveis de projeto

A função objetivo a ser minimizada é o custo total da torre, representado pelas parcelas do concreto e da armadura, definida na forma:

$$f_{obj}(x) = V_c C_c + M_s C_s \quad (3)$$

onde V_c é o volume líquido de concreto e o M_s é a massa de aço, C_c e C_s são os custos do concreto por unidade de volume, e custos do aço por unidade de massa, respectivamente.

3.2 Restrições

As restrições adotadas para o problema proposto são relativas a parâmetros da geometria, ao critério de resistência (ELU), ao comportamento em serviço (ELS), à frequência natural da torre e às taxas máximas e mínimas de armadura longitudinal.

3.2.1 Parâmetros Geométricos

Por se tratar de uma torre de concreto armado, o diâmetro da base $d_{1,inf}$ não possui nenhuma restrição com relação ao seu tamanho máximo. Porém, visando a diminuição do tempo de otimização, optou-se por restringir o diâmetro máximo a um valor superior d_{max} . O menor diâmetro possível da base ficou restrito ao diâmetro do topo. Sendo assim, tem-se:

$$\begin{aligned} d_{1,inf} - d_{max} &\leq 0 \\ d_t - d_{1,inf} &\leq 0 \end{aligned} \quad (4)$$

onde d_t é o diâmetro do topo da torre.

Para evitar a forma de cone reverso em qualquer dos segmentos, as seguintes restrições são necessárias:

$$d_{1,sup} - d_{1,inf} \leq 0 \quad (5)$$

$$d_{2,inf} - d_{1,sup} \leq 0 \quad (6)$$

$$d_{2,sup} - d_{2,inf} \leq 0 \quad (7)$$

$$d_{3,inf} - d_{2,sup} \leq 0 \quad (8)$$

$$d_{3,sup} - d_{3,inf} \leq 0 \quad (9)$$

Inicialmente, a torre será dividida em três segmentos por motivos construtivos, mas pode-se variar esse número de segmentos. À medida que a quantidade de segmentos aumenta, a quantidade de restrições geométricas varia.

A espessura mínima da parede da torre é definida como sendo:

$$t_{min} - t_3 \leq 0 \quad (10)$$

Onde t_3 corresponde à espessura do terceiro segmento de concreto, o qual está localizado no topo, conforme Figura 3. Para evitar que a espessura de um dado segmento seja maior que a dos segmentos abaixo dele, impõe-se que

$$t_{i+1} - t_i \leq 0, \quad i = 1, 2 \quad (11)$$

Para as espessuras, considerou-se o valor constante em cada segmento, visando um processo construtivo viável e seguindo as tendências construtivas atuais.

Conforme Silva et al. (2008) é necessário também garantir a compatibilidade entre a espessura e o diâmetro externo através das restrições:

$$2t_i - d_{i,\text{sup}} \leq 0 \quad i = 1, 2, 3 \quad (12)$$

onde d_i é o diâmetro externo e t é a espessura do segmento analisado.

3.2.2 Critérios de Resistência

A capacidade resistente última da seção em cada nó deve obedecer às seguintes condições:

$$M_{Sd,i} - M_{Rd,i}(N_{Rd,i}) \leq 0 \quad i = 1..n \quad (13)$$

Onde M_{Sd} corresponde ao momento solicitante e M_{Rd} corresponde ao momento resistente da seção analisada (Silva et al., 2008).

Para a análise de resistência das seções transversais da torre eólica de concreto armado circulares vazadas, com um número arbitrário de camadas de armaduras longitudinais, adotou-se uma formulação aproximada desenvolvida por Quaranta et al. (2017). Essas formulações mais simples tornam o processo de otimização menos oneroso, especialmente durante a fase de pré-dimensionamento da estrutura, onde diversas configurações são analisadas (Quaranta, et al., 2017). O modelo não-linear do concreto seguiu o modelo da NBR 6118 (ABNT, 2014), onde o diagrama parábola-retângulo foi considerado para o concreto comprimido. Já para o aço, se considerou um modelo elástico-linear. Adotou-se o diagrama tensão-deformação parábola-retângulo para análise no estado limite último (ELU) de compressão tanto para cálculo dos esforços resistentes últimos quanto para cálculo de tensões e deformações.

A resistência à força axial deve satisfazer a equação

$$N_{Rd,\text{min},i} \leq N_{Sd,i} \leq N_{Rd,\text{máx},i} \quad i = 1..n \quad (14)$$

Onde N_{Sd} corresponde à força axial solicitante e $N_{Rd,\text{min}}$ e $N_{Rd,\text{máx}}$ às forças axiais máximas e mínimas, respectivamente, correspondendo à compressão e tração. Esses valores foram obtidos utilizando a formulação proposta por Quaranta et al. (2017).

A resistência ao cisalhamento pode ser definida como:

$$Q_{Sd,i} - Q_{Rd,i} \leq 0 \quad i = 1..n \quad (15)$$

onde Q_{Sd} é o esforço cortante solicitante e Q_{Rd} é o valor do esforço de cisalhamento resistente em seções tubulares vazadas, calculado de acordo com a formulação proposta por Queiroz Junior et al. (2016).

3.2.3 Limite na frequência natural da torre

A restrição da frequência natural da torre eólica é de fundamental importância para evitar a ressonância da estrutura com os carregamentos atuantes e da turbina (Van Zyl et al, 2015). Para evitar a ressonância, a frequência natural da torre eólica deve ser completamente separada da frequência da turbina. A frequência natural da torre deve estar

contida entre f e $3f$, onde uma margem de segurança de 10% deve ser aplicada para suportar a tolerância nas suposições e cálculos de dimensionamento (Ma & Meng, 2014).

$$f_{\min} \leq f \leq f_{\max} \quad (16)$$

Onde f_{\min} corresponde a $1,1f$ e f_{\max} corresponde a $2,7f$.

3.2.4 Armaduras longitudinais

A área mínima e máxima de aço longitudinais são restritos conforme abaixo. Como o formato do segmento de concreto é cônico, a área mínima de armadura é condicionada pelo diâmetro inferior (da base) e a área máxima é condicionada pelo diâmetro superior (do topo do segmento). Tem-se, portanto, para cada segmento estudado:

$$\begin{aligned} A_{si} - \rho_{\max} A_c &\leq 0 \\ \rho_{\min} A_c - A_{si} &\leq 0 \end{aligned} \quad (17)$$

onde ρ_{\min} e ρ_{\max} são as respectivas taxas mínima e máxima da armadura longitudinal determinadas em conformidade com a NBR 6118 (ABNT, 2014).

3.2.5 Comportamento em serviço

O deslocamento no topo (Δ_{topo}) deve ser limitado para evitar o Estado de Deformação Excessiva e por questões operacionais. Entretanto, o valor limite Δ_{\max} específico para torres eólicas de concreto armado ou similares não é definido por normas e muitas vezes é definido pelo próprio fabricante da turbina. Devido à dificuldade de acesso a esta informação, tem-se adotado (Zyl, 2014) o valor limite $\Delta_{\max} = H/300$ com base no ACI 307 (American Concrete Institute, 2008). Desse modo, tem-se:

$$\Delta_{\text{topo}} - \Delta_{\max} \leq 0 \quad (18)$$

É importante ressaltar que, devido à limitada disponibilidade de dados sobre as condições de carregamento, essa verificação tem sido realizada para uma condição de operação extrema, e, a fim de buscar deslocamentos mais adequados para uma condição de operação normal, Zyl (2014), seguindo uma recomendação dos próprios fabricantes, adota um coeficiente de redução dos deslocamentos obtidos, exibido mais adiante.

3.3 Solução do problema de otimização

O modelo de otimização foi implementado em C++ e resolvido usando algoritmos genéticos implementado no software BIOS (*Biologically Inspired Optimization Tool*), desenvolvido no Laboratório de Mecânica Computacional da UFC (LMCV). Os motivos pelos quais optou-se pela utilização dos algoritmos genéticos foram as vantagens que os mesmos apresentam em relação aos métodos clássicos (determinísticos). É um método de busca de ordem zero (não usa informações de gradientes), e vêm obtendo êxito em suas diferentes aplicações como ferramenta de otimização na área de estruturas.

Um outro ponto favorável à escolha dos algoritmos genéticos é a sua facilidade no tratamento das variáveis de um problema de natureza discreta, o que possibilita a determinação de uma solução ótima que seja executável na prática.

O método dos algoritmos genéticos utiliza números aleatórios e procedimentos estocásticos para determinação do ponto ótimo. As decisões feitas durante o procedimento do algoritmo são baseados em uma geração de números aleatórios. Desse modo, se executados em diferentes pontos, os algoritmos podem levar a uma sequência diferente de soluções, mesmo sob as mesmas condições iniciais. Eles tendem a convergir a um ponto da função correspondente ao mínimo global, mas não se pode garantir a convergência ou otimalidade global da solução encontrada (Arora, 2017).

4 APLICAÇÕES

O modelo proposto foi aplicado para torres tubulares com altura de 100 m utilizando os carregamentos obtidos para o modelo de vento EWM para o ELU e o EOG para os carregamentos no ELS, conforme Tabela 2, considerando simplificações na não-linearidade física (Barroso Filho, 2018). Os dados gerais dos materiais utilizados para análise do problema estão apresentados na Tabela 3 e adotou-se os modelos da NBR 6118 (ABNT, 2014) para determinação das propriedades do concreto. Os modelos de otimização analisados possuem coeficientes de ponderação dos esforços de acordo com a IEC 61400-1 e seguindo as recomendações de Zyl (2014), conforme Tabela 4.

Tabela 3 - Dados gerais dos materiais utilizados na análise

Concreto (NBR 6118)	
f_{ck} (MPa)	80,00
E_{ci} (GPa)	45,13
Poisson	0,20
Peso Específico (kN/m ³)	25,00
ϵ_{c2}	0,002516
ϵ_{cu}	0,0026035
Aço (NBR 6118)	
f_{yk} (MPa)	450,00
E_s (GPa)	200,00
Peso Específico (kN/m ³)	78,50

O parâmetro ϵ_{c2} representa a deformação específica de encurtamento do concreto no início do patamar plástico, já o ϵ_{cu} representa a deformação específica de encurtamento do concreto na ruptura.

Para as seções estudadas, levou-se em consideração a redução do módulo de elasticidade da seção por conta da fissuração. Barroso Filho (2018) propôs a adoção dos coeficientes 0,31 para o módulo de elasticidade no ELU, e de 0,41 para o ELS. Essa proposta foi sugerida visando o uso de elementos de viga e considerando uma não-linearidade simplificada. A adoção dessas simplificações na otimização pode tornar o processo mais eficiente.

Tabela 4 - Coeficientes de ponderação dos esforços solicitantes no ELU e ELS

Coefficiente de ponderação dos esforços solicitantes

	<i>NBR 6118</i>	<i>IEC 61400-1</i>
ELU		
Cargas permanentes	1,0	0,9
Cargas de Vento	1,4	1,6
Cargas da Turbina	1,4	1,35
ELS		
Cargas permanentes	1,0	0,6*
Cargas de Vento	0,3	0,6*
Cargas da Turbina	0,3	0,6*

*Valores definidos por Zyl (2014).

A Tabela 5 exibe os parâmetros utilizados para determinação da pressão dinâmica do vento conforme Eq. (1). A velocidade básica do vento para o modelo EWM $V_{0,ELU}$ foi obtido a partir da velocidade de 59,5 m/s aplicada na torre a uma altura correspondente a 100 m, e convertida para uma altura de 10 m, obtendo-se 46,19 m/s. Para o modelo de vento EOG com 35 m/s, a velocidade a 10 m de altura foi de 22,08 m/s.

Tabela 5 - Parâmetros para determinação da pressão dinâmica do vento

Modelo de Vento Dinâmico – NBR 6123	
$V_{0,ELU}$ (m/s)	46,19
$V_{0,EOG}$ (m/s)	22,08
S_1	1,0
S_3	0,95
b	0,86
p	0,185
z_r (m)	10,0
γ	2,7
ζ	0,015

Para as variáveis de projeto, adotou-se os limites máximos e mínimos, respectivamente, de 10 m e 3,6 m para o diâmetro externo, 0,5 m e 0,2 m para a espessura e 1200 e 80 barras para a armadura longitudinal no segmento. O incremento para a construção do espaço de busca de cada variável foi de 0,02 m para o diâmetro externo, 0,01 m para a espessura e 2 barras para as armaduras.

Devido ao grande espaço de busca, verificou-se que a taxa de sucesso é baixa para populações muito pequenas e poucas gerações. Desse modo, a partir dos resultados obtidos, foi possível encontrar os parâmetros que melhor se apresentaram para este problema, conforme Tabela 6.

Tabela 6 - Parâmetros do Algoritmo Genético

Número de Otimizações	10
População	100
Gerações	200
Tolerância às restrições	1,0e-16
Método de Penalidade	Estático

Fator de Penalidade	1,0e16
Método de Seleção	Ranking
Taxa de Cruzamento	90%
Probabilidade de mutação	5%

A Tabela 7 exibe os parâmetros da torre analisada por Zyl (2014), a qual será utilizada para comparação com os resultados obtidos na otimização.

Tabela 7 - Parâmetros da torre de referência (Zyl, 2014)

Altura total (m)	100
Diâmetro externo da base (m)	7,1
Diâmetro do Topo (m)	2,0
f_{ck} (MPa)	80,0
f_{yk} (MPa)	450
E_s (GPa)	200,0
Armadura longitudinal	5068 mm ² /m por camada
Quantidade de camadas de armadura	2
Espessura da parede na base (m)	0,4
Espessura da parede no topo (m)	0,3
Poisson	0,3
Cobrimento do concreto (m)	0,04

4.1 Resultado da Otimização

O modelo de otimização proposto foi aplicado a torres tubulares de 100 m de altura, com uma turbina de 3,6 MW no topo. Duas otimizações diferentes foram realizadas: uma considerando o módulo de elasticidade do concreto integral E_{ci} , e outra utilizando os coeficientes de redução propostos por Barroso Filho (2018), $0,31E_{ci}$ e $0,41E_{ci}$, para representar de forma simplificada os efeitos da não-linearidade física no ELU e ELS, respectivamente.

As Figuras 4 e 5 exibem os valores das variáveis de projeto e o esquema das torres otimizadas obtidas considerando o módulo de elasticidade integral e o módulo de elasticidade reduzido, respectivamente.

Na Figura 4, é possível verificar que a otimização levou a uma solução onde os segmentos não apresentaram descontinuidade nos diâmetros externos, mas apresentou descontinuidade nas espessuras e na quantidade de barras em cada segmento. Isso decorre do fato de que, à medida que se aproxima do topo, menores são os esforços. As restrições que condicionaram o resultado das variáveis de projeto foram relativas a resistência ao momento fletor na base $M_{Sd,i}$ e nas descontinuidades dos segmentos, que são regiões mais solicitadas na torre. As restrições que ficaram menos ativas foram as relativas ao cisalhamento $Q_{Sd,i}$ e à força axial $N_{Sd,i}$ atuante em cada seção. A otimização também levou a busca para o máximo de armadura longitudinal permitido na seção.

Na Figura 5, onde adotou-se a análise não-linear simplificada, diâmetros e espessuras maiores foram obtidas. O deslocamento máximo do topo foi o critério de restrição condicionante no dimensionamento da torre. Essa resposta é coerente com o esperado, pois com a redução do módulo de elasticidade, a rigidez da estrutura diminui, favorecendo o aumento dos deslocamentos. A resistência da peça na sua base com relação

ao momento solicitante $M_{Sd,i}$ também foi uma das restrições condicionantes, mas não com tanta relevância quanto o deslocamento máximo. Em relação aos custos, a torre apresentou um custo aproximadamente 15% maior que a torre da Figura 4.

Utilizando um computador com 40 núcleos, foi possível obter os resultados de cada otimização em aproximadamente 2h.

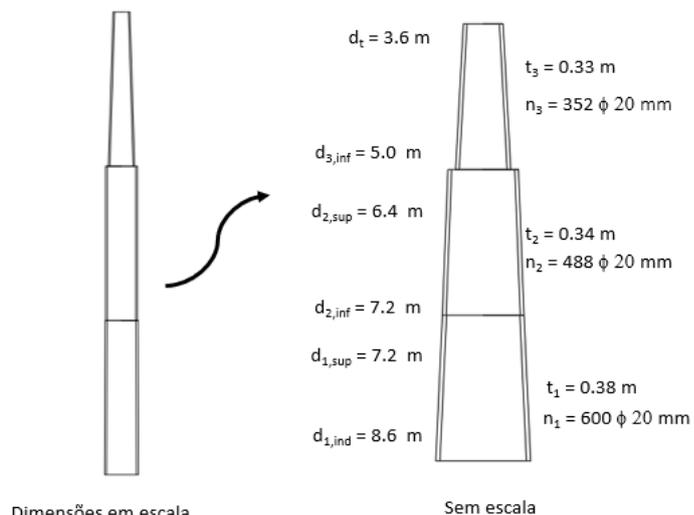
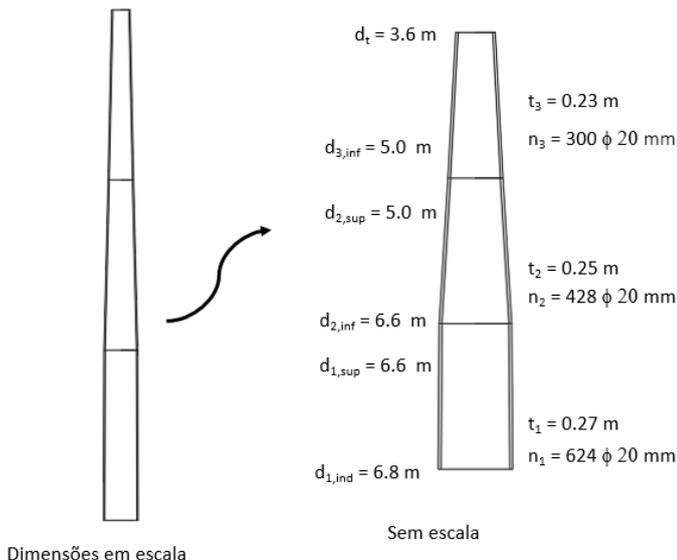


Figura 4 - Resultado da otimização quando o Eci é intacto

Figura 5 – Resultado da otimização com Eci reduzido

Comparou-se os resultados obtidos com a torre analisada por Zyl (2014). Ao se considerar a análise linear, as dimensões da torre otimizada foram menores que as obtidas por Zyl (2014), com aproximadamente 13% a menos de volume de concreto. Já na análise não-linear simplificada, obteve-se dimensões maiores para os diâmetros e espessuras, com volume de concreto em torno de 38% maior que o volume da torre de Zyl (2014). É importante destacar que o vento adotado na otimização é amplificado por um fator dinâmico, ou seja, causa maiores deslocamentos que o proposto por Zyl (2014) e foram realizadas análises verificando os critérios de resistência e deslocamento, enquanto no trabalho citado essas considerações não foram levadas em consideração na análise.

5 CONCLUSÕES

Estratégias de otimização para o dimensionamento de torres eólicas de concreto armado foram desenvolvidas e investigadas através de implementações computacionais. O modelo de otimização proposto foi aplicado com sucesso a uma turbina de 3,6 MW, onde o dimensionamento otimizado foi obtido utilizando algoritmos genéticos. A minimização do custo como função objetivo representa satisfatoriamente o problema, já que os dimensionamentos realizados atualmente buscam sempre minimizar os custos e garantir a segurança da estrutura ao mesmo tempo.



Por se tratar de um problema com grande espaço de busca, percebeu-se que a ferramenta pode contribuir na fase de pré-dimensionamento dessas estruturas, pois convergência local foi encontrada. Entretanto, baixas taxas de sucesso foram obtidas, confirmando que ótimo global não foi atingido para o número de gerações e população adotados. Para um dimensionamento ótimo global, um esforço computacional maior é exigido, podendo tornar inviável o processo de otimização para o problema analisado.

A consideração da não-linearidade física através da redução do módulo de elasticidade, do vento dinâmico simplificado e da análise utilizando elemento de viga, torna o problema de otimização de torres eólicas de concreto armado mais vantajoso, pois o torna realista sem exigir grande esforço computacional.

Populações maiores não necessariamente apresentaram melhores resultados. Com a evolução dos indivíduos no processo de otimização, foi possível verificar que à medida que a quantidade de gerações aumentava nas análises, melhores foram os resultados obtidos. É importante ressaltar, entretanto, que os resultados obtidos podem variar significativamente conforme os coeficientes de custo do concreto e do aço variam. O modelo de otimização é útil para casos onde há uma mudança nos valores dos materiais, pois pode facilmente ser adaptado.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos à CAPES pelo apoio financeiro para a realização desta pesquisa e agradecimentos ao Laboratório de Mecânica Computacional e Visualização pelo espaço e todo equipamento fornecidos.

REFERÊNCIAS

- ABNT, 1988. *NBR 6123: Forças devidas ao vento em edificações*, Rio de Janeiro.
- ABNT, 2014. *NBR 6118: Projeto de Estruturas de Concreto - Procedimento*, Rio de Janeiro.
- Al-Kaimakchi, A., Jung, S., Rambo-Roddenberry, M. & Amirinia, G., 2017. *Optimization of alternative towers for wind turbines in low wind resource regions*. Gainesville, Florida.
- American Concrete Institute, 2008. *ACI-307: Design and Construction of Reinforced Concrete Chimneys*.
- Arora, J. S., 2017. *Introduction to Optimum Design*. 3ª ed. Iowa: Elsevier.
- Bai, H., Cherfils, J. M., Aoudes, Y. & Lemosse, D., 2017. Optimization of a tall wind turbine tower. *S19-Congrès Français de Mécanique*.
- Barroso Filho, N. F., 2018. Estudo comparativo de procedimentos de análise estrutural para torres eólicas de concreto armado. *Tese de Mestrado*.
- Brasil, R. M. L. R. F. & Silva, M. S. d. P., 2016. Análise dinâmica não-linear de torres em concreto armado submetidas ao vento sintético. *XXXVII CILAMCE*.
- Gama, P. V. C. N., 2015. *Contribuições ao dimensionamento de torres eólicas de concreto*, São Paulo.
- GWEC, 2017. *Global Wind Energy Council*. [Online] Available at: <http://gwec.net/global-figures/graphs/> [Acesso em 22 Março 2018].
- Hau, E., 2013. *Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics*. 3ª ed. Munich: Springer.



- LaNier, M., 2005. *LWST Phase I Project Conceptual Design Study: Evaluation of Design and Construction Approaches for Economical Hybrid Steel/Concrete Wind Turbine Towers*, Colorado.
- Lima, J. B. C. A., 2011. *Contribuições para otimização estrutural de torres tubulares de aço para turbinas eólicas (Tese de Mestrado)*, Fortaleza: Universidade Federal do Ceará.
- Ma, H. W. & Meng, R., 2014. Optimization of prestressed concrete wind-turbine tower. *Science China Technological Sciences*, Volume 57, pp. 414-422.
- Nicholson, J. C., Arora, J. S., Goyal, D. & Tinjum, J. M., 2013. *Multi-objective structural optimization of wind turbine tower and foundation systems using Isight: A process automation and design exploration software*. Orlando, Florida.
- Quaranta, G., Trantadue, F. & Marano, G. C., 2017. Closed-form approximation of the axial force-bending moment diagram for hollow circular reinforced concrete cross-sections. *Engineering Structures*, Volume 153, pp. 516-524.
- Queiroz Junior, F. O. & Horowitz, B., 2016. Shear strength of hollow circular sections. *Revista Ibracon de Estruturas e Materiais*, Volume 9, pp. 214-225.
- Silva, M. A., Brasil, R. M. L. R. F. & Arora, J. S., 2008. Formulations for the optimal design of RC wind turbine towers. *International Conference on Engineering Optimization*.
- Silva, M. A., Brasil, R. M. L. R. F. & Arora, J. S., 2008. Otimização de torres de telecomunicações em concreto armado baseada em resultados experimentais. *International Conference on Engineering Optimization*.
- Van Zyl, W. S. & Van Zijl, G. P. A. G., 2015. Dynamic behaviour of normally reinforced concrete wind turbine support structures. *Journal of the South African Institution of Civil Engineering*, Volume 57, pp. 38-44.
- Zyl, W. S. v., 2014. *Concrete Wind Turbine Towers in Southern Africa*, Stellenbosch.