



OTIMIZAÇÃO DE *RISERS* COMPÓSITOS UTILIZANDO ALGORITMOS BIOINSPIRADOS

Marina Alves Maia^a

Evandro Parente Junior^a

marinaalvesmaia@gmail.com

evandro@ufc.br

^a Laboratório de Mecânica Computacional e Visualização (LMCV), Departamento de Engenharia Estrutural e Construção Civil, Universidade Federal do Ceará, Campus do Pici, Bloco 728, 60440-900, Fortaleza, Ceará, Brasil.

Abstract. *Este trabalho apresenta uma metodologia para otimização de risers de material compósito em configuração de catenária livre, visando a redução do custo de fabricação através da minimização da quantidade de material compósito utilizado. As variáveis de projeto são o número de lâminas, a orientação e a espessura de cada uma delas, estando limitadas a valores discretos. O modelo inclui restrições de resistência e estabilidade do riser. Devido ao uso de variáveis discretas, a otimização é feita utilizando dois tipos de algoritmos bioinspirados: os Algoritmos Genéticos (AG) e a Otimização por Nuvem de Partículas (PSO). A formulação utiliza uma metodologia de análise global-local, sendo um modelo de cabo inextensível utilizado na análise global e a Teoria Clássica da Laminação (TCL) utilizada na análise local. Foram investigadas alternativas de projeto considerando as propriedades do material compósito no estado não degradado e no estado degradado. Os resultados obtidos pelos dois algoritmos convergiram e foram coerentes com o esperado: a espessura da parede do riser é maior quando se considera o efeito da corrente. As propriedades (degradadas ou não degradadas) do material compósito, entretanto, não influenciaram na espessura final otimizada. Destaca-se, por fim, o desempenho do PSO, que atingiu convergência mais rápida junto à melhores taxas de sucesso em comparação aos AG.*

Palavras-chave: *Otimização, Materiais compósitos, Risers.*

1 INTRODUÇÃO

Risers são tubos que conectam uma estrutura flutuante *offshore* aos equipamentos e dutos situados no fundo do mar, tanto para fins de produção quanto para perfuração, injeção ou exportação. Com a crescente demanda por petróleo e gás, lâminas d'água cada vez maiores são exploradas, encarecendo a produção dessas estruturas, sujeitas a condições de serviço adversas e cargas dinâmicas elevadas, resultando em problemas de projeto, instalação e operação. Uma vez que essas estruturas são usualmente feitas de aço, tornam-se muito pesadas no caso de águas profundas, demandando plataformas e/ou navios maiores e sofrendo altas tensões no topo e problemas de fadiga.

Uma opção para contornar esse problema são os *risers* feitos de material compósito reforçados por fibras, uma vez que estes materiais possuem características como altas relações resistência/peso, rigidez/peso, bom isolamento térmico e boa resistência à corrosão (Ochoa, 2006). Entretanto, surgem com eles as inúmeras possibilidades de combinações de espessuras, ângulos de orientação de cada lâmina, sem contar ainda com os diferentes carregamentos e condições ambientais que devem ser considerados, tornando a metodologia de tentativa e erro inadequada para o projeto dessas estruturas.

Sobressai-se, aqui, o uso da otimização, que consiste na busca pela melhor solução que respeite as restrições do problema e seja obtida em um tempo factível. Na literatura, são diversos os algoritmos metaheurísticos inspirados em processos e comportamentos que acontecem na natureza com as mais diversas aplicações. Destacam-se, nesse meio, os dois algoritmos utilizados neste trabalho, os Algoritmos Genéticos (AG) e a Otimização por Nuvem de Partículas (*Particle Swarm Optimization - PSO*).

Ambos são métodos de otimização globais, bastante robustos e que realizam buscas em paralelo, sem necessidade de derivadas e capazes de tratar problemas com variáveis discretas. Inevitavelmente, também possuem algumas desvantagens: podem, por exemplo, ser mais lentos que algoritmos baseados em gradientes e possuem parâmetros, como taxa de mutação e tamanho da população, que devem ser bem ajustados para se obter uma maior eficácia.

Neste trabalho, adotou-se a metodologia global-local para a análise do *riser*, sendo utilizado o modelo de cabo inextensível para a etapa global. Para a otimização, utilizaram-se os AG e o PSO, a fim de ratificar os resultados obtidos e comparar o desempenho de ambos na busca pelo ótimo, considerando, no modelo, restrições de fabricação, estabilidade e segurança da estrutura.

2 MODELO PROPOSTO

A formulação proposta visa minimizar o custo de fabricação de um *riser* em catenária livre (*free-hanging*) de material compósito laminado, sujeito a múltiplos casos de carga e deslocamentos horizontais *Near* e *Far* da plataforma flutuante, como mostra a Fig. 1 a, visando a otimização do esquema de laminação da parede do *riser* (tubo compósito), esquematizado na Fig. 1 b.

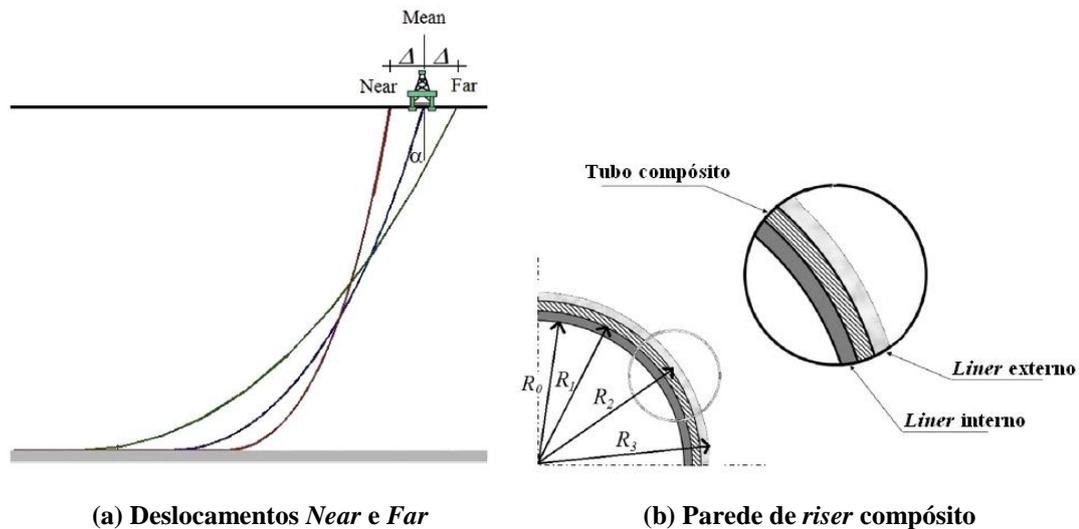


Figura 1. Riser compósito em catenária (Silva et al., 2013)

A laminação é constante ao longo do riser e o material que constitui o laminado é único, de forma que a minimização do custo corresponde à minimização da espessura do laminado que compõe a parede do riser:

$$f(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^{N_c} h_i \quad (1)$$

onde h_i é a espessura da lâmina i e N_c é o número de camadas que formam o laminado. As variáveis de projeto consideradas foram o número de camadas, a orientação das fibras de cada lâmina, bem como sua espessura.

Foi desenvolvida uma metodologia de análise em conformidade com as normas e recomendações de projeto da Det Norske Veritas (DNV), baseada na filosofia global-local. A análise global, de onde obtém-se os deslocamentos e os esforços, é feita utilizando o modelo de cabo inextensível, que permite considerar as cargas de peso, empuxo, movimento da plataforma e corrente marinha. Por outro lado, a contribuição dos momentos fletores e torsores é desprezada.

Como a análise é realizada em um cenário quase-estático e não considera efeitos dinâmicos, como o efeito das ondas, são utilizados fatores de amplificação dinâmica (β) para simular estes efeitos, majorando os esforços obtidos pela análise estática. São ainda considerados os coeficientes de segurança recomendados pela DNV, como o fator de carga funcional (γ_F) e o fator de carga ambiental (γ_E), que dependem dos casos de carga.

Na análise local, a Teoria Clássica da Laminação (TCL) é usada para executar a análise das seções críticas do riser. O liner interno e o tubo de compósito são considerados como perfeitamente colados e são analisados como um sistema estrutural único. Além disso, negligencia-se o liner externo. A análise local utilizada neste trabalho é descrita em Silva et al. (2013).

As análises globais fornecem valores de tensões e os fatores de segurança do liner e do compósito nas N_{vs} seções, de forma que cada divisão do riser possui duas seções (início e fim da divisão). Sejam SF_{ij}^l e SF_{ij}^c os fatores de segurança do liner e do compósito obtidos para o i -ésimo caso de carga na j -ésima seção e SF_{req}^l e SF_{req}^c os fatores de segurança requeridos

(mínimos admissíveis) do *liner* e do compósito, respectivamente, os requisitos de resistência são assegurados se as relações $SF_{ij}^l > SF_{req}^l$ e $SF_{ij}^c > SF_{req}^c$ forem satisfeitas:

$$g_{ij}^l(x) = \frac{SF_{req}^l}{SF_{ij}^l} - 1 \leq 0 \quad (2)$$

$$g_{ij}^c(x) = \frac{SF_{req}^c}{SF_{ij}^c} - 1 \leq 0 \quad (3)$$

Da mesma forma, calcula-se o fator de segurança de flambagem, que deve ser maior ou igual ao requerido (SF_{req}^{bck}). A restrição de flambagem é calculada desconsiderando a influência do *liner* interno, no pior caso possível, que corresponde ao *riser* vazio no *touchdown point* (TDP). Considerou-se, por fim, uma restrição relativa à contiguidade das lâminas, limitando o número de camadas com iguais orientações de fibra e espessura.

O critério de falha adotado para calcular o fator de segurança do *liner* interno foi o critério de von Mises, enquanto para o tubo compósito, utilizou-se o critério de falha de Tsai-Wu (Silva et al., 2013), computando o fator de segurança do tubo compósito como o menor fator de segurança que satisfaça todas as camadas, correspondendo à metodologia de falha da primeira lâmina (*First Ply Failure*).

O modelo de otimização de *risers* compósitos em catenária descrito acima foi implementado no programa *BIOS* (*Bio-Inspired Optimization System*) desenvolvido no LMCV/UFC (Rocha, 2013).

Para verificação e validação do modelo, um exemplo numérico foi elaborado. Trata-se de um projeto preliminar de *riser* para produção de óleo, feito de material compósito em catenária livre de raio interno 0.125 m, *liner* interno de aço (APIx65) de espessura 5 mm, 3 mm de *liner* externo polimérico, 4500 m de comprimento, ângulo de topo de 17° e lâmina d'água (LDA) de 1500 m. As propriedades intactas do material compósito foram extraídas do catálogo de produtos disponibilizados pela *ACP Composites*, já as propriedades no estado degradado foram obtidas de acordo com a DNV-OS-C501 (2013). Consideram-se apenas *risers* de laminações simétricas e balanceadas, de forma a reduzir o espaço de busca para o algoritmo, com cada lâmina podendo variar de 1 a 5 mm de espessura e as fibras de 5° em 5° entre -90° e 90°. O fator de segurança requerido para o material isotrópico foi de 1.3, para o compósito 2.1 e para a flambagem 3.0. As terminações representam 5% do *riser* e são feitas de aço.

Os seis casos de carga considerados foram: *riser* cheio de óleo ($\rho_{\text{óleo}} = 880.0 \text{ kg/m}^3$) nas posições *Near* e *Far*, *offset* de 8.5% da LDA e pressão de topo de 30 MPa; *riser* vazio com as mesmas posições, *offsets* e pressão, e os dois últimos casos consideram o hidroteste, casos em que o *offset* cai para 3% da LDA, nas mesmas posições, a pressão sobe para 37.5 MPa e o *riser* é preenchido com água ($\rho_{\text{água do mar}} = 1006.0 \text{ kg/m}^3$). Os fatores de amplificação, de carga ambiental e carga funcional foram adotados como 1.5, 1.3 e 1.1, respectivamente. O perfil de corrente marítima adotado foi um perfil triangular alinhado com o *offset* (*in-line*), começando com velocidade nula no leito do mar e crescendo linearmente até atingir 1 m/s no topo (LDA) para todos os casos de carga, exceto os de hidroteste, quando a velocidade no topo é menor, 0.3 m/s.

3 RESULTADOS

A espessura obtida do tubo compósito foi a mesma independente do uso das propriedades intactas ou degradadas do material: 36 mm. Para a comparação do desempenho dos algoritmos, entretanto, a corrente foi configurada como nula, obtendo-se, dessa forma, uma espessura menor: 28 mm. Foram realizadas variações em dois parâmetros de otimização: número de gerações e número de indivíduos. O resultado é apresentado na Tabela 1, em que TS denota Taxa de Sucesso e NGC, o Número médio de Gerações até Convergência.

Tabela 1. Desempenho do AG e PSO

Gerações x Indivíduos	AG		PSO	
	TS (%)	NGC	TS (%)	NGC
50 x 100	80,0	35,2	100,0	14,8
100 x 100	90,0	37,6	100,0	19,3
50 x 200	60,0	30,2	100,0	13,3
100 x 200	100,0	44,1	100,0	13,6

4 CONCLUSÃO

Este trabalho desenvolveu e implementou com sucesso uma formulação para otimização de *risers* compósitos em catenária livre. Os algoritmos utilizados (AG e PSO) obtiveram resultados idênticos, sendo que o PSO, quando comparado aos AG, apresentou-se como uma alternativa que combina baixo custo computacional e boa convergência.

O modelo proposto permitiu variações nos casos de carga e perfis de corrente marítima, além da possibilidade de variação da lâmina d'água e dos fatores de segurança mínimos, evidenciando sua capacidade de projetar *risers* compósitos para diferentes cenários.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao apoio financeiro dado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

REFERÊNCIAS

- Det Norske Veritas (DNV), 2013. DNV-OS-C501 – Composite Components.
- Ochoa, O. O., 2006. Composite Riser: Experience and Design Guidance, final project report. *Offshore Technology Research Center (OTRC)*, Texas A&M University.
- Silva, R. F., Teófilo, F. A. F., Parente Jr., E., Melo, A. M. C., Holanda, A. S., 2013. Optimization of composite catenary risers, *Marine Structures*, v. 33, p. 1-20.
- Rocha, I. B. C. M., 2013. Análise e Otimização de Cascas Laminadas considerando Não-Linearidade Geométrica e Falha Progressiva. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Ceará.