



## OTIMIZAÇÃO DE *RISERS* COMPÓSITOS UTILIZANDO ALGORITMOS BIOINSPIRADOS

Marina Alves Maia<sup>a</sup>

Evandro Parente Junior<sup>a</sup>

marinaalvesmaia@gmail.com

evandro@ufc.br

<sup>a</sup> 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.

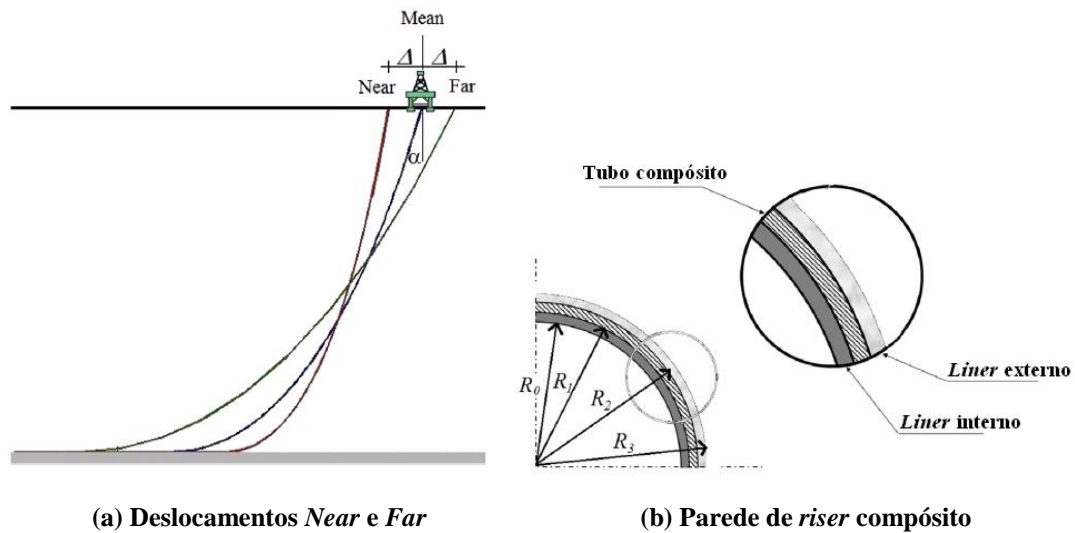


Figura 1. Riser compósito em catenária (Silva et al., 2013)

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 torsões 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 ( $\beta$ ) 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 ( $\gamma_F$ ) e o fator de carga ambiental ( $\gamma_E$ ), 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.