

# 5º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



## TÍTULO DO TRABALHO:

APLICAÇÃO DE ALGORITMOS GENÉTICOS NA OTIMIZAÇÃO DE PLACAS LAMINADAS TIPO SANDUÍCHE

## AUTORES:

Rafael F. Silva; Antonio M.C. Melo; Evandro Parente Jr.

Universidade Federal do Ceará - DEECC  
[rafaeltaua@yahoo.com.br](mailto:rafaeltaua@yahoo.com.br) ; [macario@ufc.br](mailto:macario@ufc.br); [evandro@ufc.br](mailto:evandro@ufc.br)

## INSTITUIÇÃO:

Universidade Federal do Ceará - UFC

*Este Trabalho foi preparado para apresentação no 5º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás- 5º PDPETRO, realizado pela Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás-ABPG, no período de 15 a 22 de outubro de 2009, em Fortaleza-CE. Esse Trabalho foi selecionado pelo Comitê Científico do evento para apresentação, seguindo as informações contidas no documento submetido pelo(s) autor(es). O conteúdo do Trabalho, como apresentado, não foi revisado pela ABPG. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões da Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás. O(s) autor(es) tem conhecimento e aprovação de que este Trabalho seja publicado nos Anais do 5ºPDPETRO.*

## **APLICAÇÃO DE ALGORITMOS GENÉTICOS NA OTIMIZAÇÃO DE PLACAS LAMINADAS TIPO SANDUÍCHE**

### **ABSTRACT**

Composite materials largely used in aeronautical and aerospace industry are receiving considerable attention from oil and gas industry due to their favorable structural characteristics, as high strength/weight and stiffness/weight ratios and good corrosion resistance and fatigue life. Other important advantage is their tailorability that permits to design materials to resist applied loads in an efficient way. A common type of composite materials is the laminated composite that consist of layers with different properties bonded together. A sandwich material is a special case of laminated comprising a core of one material between two layers of another material. However, the design of a composite structure is more complex than the metallic one (i.e. homogenous) due to the large number of design variables. The application of traditional design process (try and error) can be cumbersome. A design can be achieved using numerical optimization techniques by formulating the problem as a search for design variable values that minimize an objective function and satisfy imposed constraints. Sometimes, design variables assume only discrete values and objective and constraints functions may be no differentiable and not continuous. Genetic algorithms (GAs) have been applied to overcome these issues. They are based on simulation of the Darwin's Evolution Theory and Genetic concepts. They seem proper to optimization of laminated composite structures. In this work, the application of GAs to a composite sandwich plate is investigated and compared with classical mathematical programming results. This successful use has stimulated the application of GAs to design laminated fiber-reinforced composite materials that can be used in tubes and risers.

### **INTRODUÇÃO**

No Brasil, as maiores reservas de petróleo e gás se localizam no mar. Nesses casos, é necessário o uso de plataformas flutuantes ligadas ao poço por dutos (flowlines) e risers. Os dutos são responsáveis por levar o fluido do poço ao piso submarino e os risers pelo transporte do piso submarino até a plataforma flutuante. Com o aumento da demanda por derivados do petróleo e as descobertas brasileiras em águas cada vez mais profundas, surgiu a necessidade do desenvolvimento de novas tecnologias capazes de viabilizar economicamente a exploração nestas condições. O elevado custo de componentes estruturais envolvidos é um fator preponderante.

Os materiais compósitos, largamente usados na indústria aeronáutica e aeroespacial, têm recebido considerável atenção devido a características estruturais favoráveis tais como elevadas relações resistência/peso e rigidez/peso, boa resistência à corrosão e à fadiga. Ainda mais, o projeto do material compósito pode se adaptar às condições de carregamento, buscando eficiência estrutural, o que o tem tornado atrativo. A utilização de materiais compósitos pode reduzir o custo da exploração em águas profundas em função redução do peso total e de tensões, entre outros.

Um projeto estrutural trata da concepção, dimensionamento e detalhamento da estrutura, tornando-a capaz de resistir a ações externas com segurança, estabilidade, durabilidade e economia. As ações podem ser de diversas naturezas, como forças externas e variação de temperatura.

O projeto de estruturas de materiais compósitos laminados torna-se mais complexo por envolver elementos relativos ao próprio material, isto é, há a necessidade de também se projetar o material, o que não ocorre quando se trabalha com materiais metálicos. Isto insere variáveis adicionais no problema tais como a quantidade de lâminas, a espessura, o tipo de material e os elementos necessários para a sua caracterização, e a sequência de empilhamento. A aplicação do processo de projeto tradicional, onde em geral se procura uma solução satisfatória (Arora, 2004), pode-se se tornar enfadonha pelo número elevado de variáveis.

Uma solução de projeto pode ser atingida usando-se técnicas numéricas de otimização, formulando-se o problema como uma busca racional de valores para as variáveis de projeto que definem a estrutura tal que minimizem uma dada função objetivo e satisfaçam um conjunto de restrições impostas por exigências segurança, durabilidade, etc.

Algumas vezes, o modelo de otimização torna-se de difícil solução pelas técnicas clássicas de programação matemática em virtude da descontinuidade e não diferenciabilidade das funções envolvidas ou pela natureza das variáveis de projeto que assumem apenas valores dentro de um conjunto discreto previamente definido. Estas questões têm sido abordadas de forma eficiente com a aplicação de Algoritmos Genéticos (AGs) que são baseados na simulação da Teoria da Evolução de Darwin e em conceitos de Genética.

Neste trabalho, investiga-se a aplicação dos AGs para o projeto de placas laminadas tipo sanduíche e comparam-se os resultados com os obtidos com técnicas de programação matemática clássica.

### METODOLOGIA

Um material compósito é um conjunto de dois ou mais materiais diferentes, combinados em escala macroscópica, para funcionarem como uma unidade, visando obter um conjunto com propriedades que nenhum dos componentes individualmente apresenta (Mendonça, 2005; Jones, 1999). Entre essas propriedades temos: rigidez, resistência, peso, propriedades térmicas, resistência à corrosão e à fadiga.

Um tipo comumente usado de material compósito é o compósito laminado que consiste do empilhamento de camadas, devidamente coladas, que apresentam diferentes propriedades. O material laminado tipo sanduíche é um caso particular de laminado formado por três camadas, duas externas de um dado material e denominadas de faces e uma interna de outro material que é chamada de núcleo (Jones, 1999). Em uma placa sanduíche sob flexão, as faces têm como função resistir às tensões normais devidas à flexão, enquanto o núcleo mantém as faces afastadas aumentando assim o momento de inércia da peça estrutural.

Os materiais compósitos laminados reforçados por fibras pertencem a uma classe híbrida, envolvendo materiais compósitos fibrosos e técnicas de laminação (Jones, 1999). Nesse material, a fibra é o elemento responsável por melhorar as características mecânicas do compósito e a matriz protege as fibras do ambiente externo e é responsável por transmitir solicitações mecânicas às fibras.

As técnicas numéricas de otimização fornecem ferramentas para se buscar a solução ótima de um projeto de forma sistemática. Um problema de otimização pode ser posto na forma geral (Vanderplaats, 2001): determinar o vetor das variáveis de projeto  $\mathbf{X}^T = [X_1 \ X_2 \ X_3 \ \dots \ X_n]$  que

minimize  $f(\mathbf{X})$ ,

sujeito a:

$$g_j(\mathbf{X}) \leq 0 \quad j=1, m ;$$

$$h_k(\mathbf{X}) = 0 \quad k=1, l ;$$

$$X_i^l \leq X_i \leq X_i^u \quad i=1, n .$$

A função  $f(\mathbf{X})$  é a função custo ou objetivo e é um parâmetro para avaliação da qualidade (mérito) de cada solução. As funções  $g(\mathbf{X})$  e  $h(\mathbf{X})$  são restrições de desigualdade e de igualdade, respectivamente,

e geralmente são restrições de comportamento estrutural impostas à estrutura. Tanto a função objetivo como as funções de restrição podem ser lineares ou não-lineares, explícitas ou implícitas em  $\mathbf{X}$ , e podem ser avaliadas por processos numéricos ou analíticos. As últimas restrições são ditas laterais e impõem limites inferiores e superiores às variáveis de projeto.

Na maioria dos algoritmos de programação matemática clássicos, a partir de uma solução inicial  $\mathbf{X}^0$ , o projeto é atualizado iterativamente e a forma mais comum de atualização é (Vanderplaats, 2001)

$$\mathbf{X}^q = \mathbf{X}^{q-1} + \alpha^* \mathbf{S}^q,$$

onde  $q$  é o número da iteração,  $\mathbf{S}$  é o vetor que indica a direção de busca no espaço de projeto e o escalar  $\alpha^*$  define o passo nesta direção. Em geral,  $\mathbf{S}$  é escolhida tal que um pequeno movimento nessa direção produza uma redução na função objetivo sem violar as restrições. Os diversos algoritmos são caracterizados pela forma de obtenção de  $\mathbf{S}$  e de  $\alpha^*$ .

Não raro, em problemas de engenharia estrutural, as funções objetivo ou as restrições apresentam descontinuidades ou não são diferenciáveis. Também é comum as variáveis de projeto só assumirem valores inteiros ou estarem restritas a um conjunto de valores discretos, caracterizando um problema de natureza combinatória.

Nesses casos, os algoritmos genéticos, cujos princípios básicos foram desenvolvidos por Holland (1975), se apresentam mais atrativos (Sadiq & Habib, 1999). Os AGs, uma subclasse da computação evolucionária (De Jong, 2006), são poderosas técnicas de projeto que manipulam soluções baseados na Teoria da Evolução de Darwin e conceitos da Genética em busca da solução ótima global. Esses algoritmos simulam o processo de evolução das espécies, que por sua vez se baseia na teoria da seleção natural. Tal teoria assume que alguns indivíduos possuem características que os tornam mais adaptados ao meio e estes possuem mais chances de sobrevivência e de passarem suas características à próxima geração.

Assim, os AGs manipulam números como populações de indivíduos formados por cromossomos e genes, os quais durante o processo de evolução são submetidos à seleção e à reprodução com operadores de cruzamento e mutação. Os AGs são probabilísticos na seleção dos pontos do espaço de busca ou indivíduos a serem analisados, portanto garantem a busca pelo ponto ótimo global. A informação básica para a busca da solução ótima é o valor da função aptidão de cada projeto ou indivíduo, portanto, trabalham facilmente com qualquer tipo de função e variáveis, daí sua robustez. É importante notar que, em problemas com restrições, a aptidão do indivíduo depende não só do valor da função objetivo, mas também do valor das restrições. Por ser um algoritmo de ordem zero, pode apresentar, porém, um elevado custo computacional dependente da complexidade do problema, principalmente com relação à análise.

Segundo Goldberg (1989), com relação à robustez, os AG's se diferenciam dos procedimentos tradicionais por trabalharem com uma codificação das variáveis e não com valores propriamente ditos, fazerem buscas dentro de uma população de pontos, trabalharem com informação da função objetivo e não de derivadas e usarem regras de transição probabilística. Além dessas, Silva (2001) elenca como vantagens dos AG's o fato de que: Funcionam tanto com parâmetros contínuos como discretos ou com uma combinação deles; Otimizam um grande número de variáveis; Otimizam parâmetros de funções objetivos com superfícies complexas e complicadas, reduzindo a convergência para mínimos locais; Adaptam-se bem a computadores paralelos; Fornecem uma lista de parâmetros ótimos e não uma simples solução; Trabalham com dados gerados experimentalmente e são tolerantes a ruídos e dados incompletos; São fáceis de serem implementados em computadores; São modulares e portáteis, no sentido que o mecanismo de evolução é separado da representação particular do problema

considerado. Assim, eles podem ser transferidos de um problema para outro; São flexíveis para trabalhar com restrições arbitrárias e otimizar múltiplas funções com objetivos conflitantes; Podem ser facilmente hibridizados com outras técnicas heurísticas; São robustos e aplicáveis a uma grande variedade de problemas.

Por outro lado, Silva (2001) também destaca como desvantagens: Dificuldade para achar o ótimo global exato; Necessidade de um grande número de avaliações das funções de aptidão e suas restrições; Grande possibilidade de configurações podendo complicar a resolução.

O problema de projeto de uma placa sanduíche simplesmente apoiada em duas bordas paralelas submetida à flexão com carregamento distribuído foi formulado neste trabalho como um problema de otimização. As variáveis de projeto são as espessuras do núcleo e das faces. A função objetivo é a massa da placa. Consideraram-se restrições relativas à rigidez, resistência e estabilidade, além de restrições laterais, dando um total de sete restrições. Matematicamente:

$$\text{Minimizar} \quad P(H_N, h_f) = (2\gamma_f h_f + \gamma_N H_N) bL,$$

sujeito a:

$$\frac{100}{L} \left( \frac{(2K_b PL^3(1-v^2))}{E_f h_f (H_N + 2h_f)^2 b} + \frac{K_s PL}{(H_N + 2h_f)Gb} \right) - 1 \leq 0 \quad (\text{restrição de flecha})$$

$$\frac{1}{\sigma_{MAX}} \frac{M}{bh_f (H_N + 2h_f)} - 1 \leq 0 \quad (\text{Restrição de tensão normal})$$

$$\frac{1}{\tau_{MAX}} \frac{V}{b(H_N + 2h_f)} - 1 \leq 0 \quad (\text{Restrição de tensão cisalhante})$$

$$\frac{M}{0.82E_f bh_f (H_N + 2h_f)} \left( \frac{E_f H_N}{E_N h_f} \right)^{0.5} - 1 \leq 0 \quad (\text{Restrição de esmagamento das faces})$$

$$\frac{MS^2(1-v^2)}{2E_f bh_f^3 (H_N + 2h_f)} - 1 \leq 0 \quad (\text{Restrição de enrugamento})$$

$$-h_f + h_{fMAX} \leq 0 \quad (\text{Restrição de espessura das faces})$$

$$-H_N + H_{NMAX} \leq 0 \quad (\text{Restrição de espessura do núcleo})$$

Onde:  $h_f$  é a espessura da face e  $H_N$  é a espessura do núcleo;  $\sigma_{MAX}$  é a tensão máxima nas faces;  $q$  é a carregamento distribuído;  $M$  é o Momento fletor Maximo;  $b$  é a largura da placa (direção dos apoios);  $L$  é o vão;  $\tau_{MAX}$  é a tensão cisalhante máxima;  $V$  é o esforço cortante máximo;  $v$  é o

Coefficiente de Poisson;  $Kb$  é a constante de deflexão por flexão;  $K_S$  é a constante de deflexão por cisalhamento;  $E_f$  é o módulo de elasticidade das faces;  $E_N$  é o Módulo de elasticidade do núcleo;  $G$  é módulo de cisalhamento do núcleo;  $S$  é o tamanho das células no núcleo;  $\gamma_f$  é a massa específica das faces; e  $\gamma_N$  é a massa específica do núcleo.

Esta formulação foi aplicada a uma placa sanduíche com os seguintes parâmetros:  $\sigma_{MAX} = 165$  Mpa;  $q = 1.167$  N/m;  $b = 1.219$  m;  $L = 2.438$  m;  $\tau_{MAX} = 0.67$  Mpa;  $\nu = 0.3$ ;  $K_b = 0.01302$ ;  $K_S = 0.125$ ;  $E_f = 70$  GPa;  $E_N = 483$  Mpa;  $G = 146$  Mpa;  $S = 0.009525$  m;  $\gamma_f = 3.1$  g/cm<sup>3</sup>;  $\gamma_N = 0.005$  g/cm<sup>3</sup>.

Este problema foi resolvido por Kague *et al* (1998) usando um algoritmo de pontos interiores. No presente trabalho o problema foi resolvido utilizando dois métodos. Em ambos, as variáveis foram tratadas como contínuas, como na literatura. No primeiro método, foi utilizado o algoritmo de região de confiança do MATLAB por meio da função *fmincon*. Como estratégia usual de solução de problemas de Programação Matemática, o problema foi resolvido iniciando-se de dois pontos distintos do espaço de projeto. No primeiro ponto, as espessuras do núcleo e das faces foram de 0.0635 m e 0.000635 m respectivamente, enquanto no segundo ponto eram de 0.0508 m e 0.000508 m.

No segundo método, foram utilizados algoritmos genéticos. Foi utilizada a função *ga* do MATLAB com seus parâmetros default, sendo modificado apenas o tamanho da população. Resultados satisfatórios foram obtidos com população de 100 indivíduos (valor default é 20). Na resolução do problema, devido ao caráter aleatório dos algoritmos genéticos, o programa foi executado varias vezes para melhor inferência dos dados. Os resultados obtidos pelos dois métodos foram comparados com resultados existentes na literatura (Kague, 1998).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 1 são apresentados os resultados obtidos resolvendo-se o modelo proposto usando programação matemática clássica (PM) e os resultados de Kague (1998). A diferença dos resultados da PM em relação aos de Kague é mostrada na tabela.

Tabela 1 – Resultados para a placa sanduíche usando programação matemática.

	1º Caso			2º Caso		
	Variáveis de Projeto		Func. Obj.	Variáveis de Projeto		Func. Obj.
Projeto Ótimo	Núcleo (m)	Face (m)	Peso(Kgf)	Núcleo (m)	Face (m)	Peso(Kgf)
Kague (1998)	0.03249	0.000465	13.38000	0.032496	0.000465	13.37700
MATLAB (PM)	0.03400	0.000400	12.36000	0.034003	0.000400	12.36000
Diferença (%)	-	-	-7.62	-	-	-7.60

Na Tabela 2 são apresentados os cinco melhores resultados de quinze execuções aplicando os algoritmos genéticos. A diferença dos resultados dos AGs em relação aos de PM é mostrada na tabela. Verifica-se que os resultados foram excelentes.

Tabela 2 – Resultados para a placa sanduíche usando AG.

Execuções	Variáveis de Projeto		Peso(Kgf)	Diferença entre PM e AG (%)
	Núcleo (m)	Face (m)		
AG15	0.034056	0.000399	12.35	-0.11
AG13	0.034051	0.000399	12.35	-0.12
AG6	0.033675	0.000407	12.45	0.72
AG1	0.032630	0.000433	12.77	3.32
AG3	0.035167	0.000400	12.52	1.31

## CONCLUSÕES

Pode-se concluir que tanto os algoritmos clássicos de programação matemática quanto os AGs são adequados para resolver o problema da otimização de uma placa sanduíche, uma vez que os resultados dos três métodos pouco diferem entre si. Se pensarmos na solução do problema considerando que as variáveis assumem somente valores discretos, como é comum na prática da Engenharia, então os AGs se apresentam como a escolha mais adequada. Esta formulação está sendo estendida para a otimização de tubos laminados de material compósito reforçado com fibras considerando a natureza discreta das variáveis.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq, FUNCAP e ANP pelo apoio financeiro ao desenvolvimento desta pesquisa.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARORA, J. S. (2004) *Introduction to Optimum Design*. 2nd Ed, Elsevier.
- DANIEL, I.; ISHAI, O. (2005) *Engineering Mechanics of composite materials*. Oxford University.
- De JONG, K. A. (2006) *Evolutionary Computation*. 1st Ed. MIT.
- GOLDBERG, D. E. (1989) *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*. 1<sup>st</sup> Ed. Addison-Wesley Professional.
- HOLLAND, J. H. (1975) *Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology. Control and Artificial Intelligence*. MIT.
- JONES, R. M (1999) *Mechanics of Composite Materials*. 2nd Ed. Philadelphia, Taylor & Francis.
- KAGUE, C.K.; MANGONI, C.; FANCELLO, E.A; PEREIRA, J.T; MENDONÇA, P.T (1998) Otimização de placas sanduíche utilizando método dos pontos interiores. ENCITA
- MENDONÇA, P.T.R. (2005) *Materiais Compósitos e Estruturas Sanduíches - Projeto e Análise*. .
- SADIQ, M. S.; HABIB Y. (1999) *Iterative Computer Algorithms in Engineering - Solving Combinatorial Optimization Problems*. California, IEEE Computer Society.
- SILVA, E. E. (2001) *Otimização de estruturas de concreto armado utilizando algoritmos genéticos*. Tese (Doutorado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

**5º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS**

VANDERPLAATS, G. N (2001) *Numerical Optimization Techniques for Engineering Design*. 3rd ed. Colorado, Vanderplaats Research and Development.