



CILAMCE2014

XXXV IBERIAN LATIN AMERICAN CONGRESS
ON COMPUTATIONAL METHODS IN ENGINEERING
FORTALEZA - CEARÁ - BRAZIL | NOVEMBER 23-26, 2014

OTIMIZAÇÃO DE RISERS EM CATENÁRIA COM AMORTECEDORES HIDRODINÂMICOS

Giovanny Alfredo Rey Nariño

Luiz Fernando Martha

giorey27-6@hotmail.com

lfm@tecgraf.puc-rio.br

Departamento de Engenharia Civil,

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio)

Rua Marquês de São Vicente 225, Gávea, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 22453-900

Ivan Fábio Mota de Menezes

ivan@puc-rio.br

Departamento de Engenharia Mecânica,

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio)

Rua Marquês de São Vicente 225, Gávea, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 22453-900

Resumo. *Este trabalho apresenta um processo de otimização aplicado ao estudo do comportamento estrutural de risers em catenária com amortecedores hidrodinâmicos conectados a uma unidade flutuante tipo FPSO. As dimensões e o posicionamento desses amortecedores são obtidos por meio de técnicas de otimização multiobjetivo, buscando-se minimizar os efeitos provocados pelas ondas de compressão ao longo dos risers e os custos envolvidos na utilização desses amortecedores, respeitando-se algumas restrições geométricas. O processo de otimização é realizado por meio do algoritmo genético NSGA-II, disponível no programa modeFRONTIER. O equilíbrio dinâmico dos risers, verificado em cada passo da otimização, é obtido por meio do programa Anflex. Desta forma, espera-se contribuir com informações sobre o comportamento estrutural da configuração geométrica de risers em catenária com amortecedores hidrodinâmicos RCHA e, por sua vez, implementar um procedimento de busca das melhores configurações para diminuir o tempo e custo computacional empregados na escolha da configuração ótima. São utilizados exemplos representativos para demonstrar a eficiência e a viabilidade da utilização da metodologia proposta.*

Palavras-chave: *Projeto de risers. Anflex. Amortecedores hidrodinâmicos. Otimização estrutural. Algoritmos genéticos*

1 INTRODUÇÃO

Devido à contínua demanda de óleo, as empresas de petróleo têm sido forçadas a explorar novas reservas em águas cada vez mais profundas, o que representa um maior desafio em termos operacionais, de segurança e econômicos. De fato, com as descobertas da Petrobras em lâminas d'água da ordem de 2 mil metros na camada de pré-sal, que se estende do litoral do estado do Espírito Santo ao de Santa Catarina, os *risers*, que são os principais componentes responsáveis pelo transporte de óleo desde o reservatório até a unidade flutuante, passaram a ser solicitados de forma mais intensa. Um dos principais problemas que afetam o comportamento dos *risers* são as ondas compressivas de grande amplitude que atuam sobre eles e que são geradas pela transmissão de movimentos das unidades flutuantes. A propagação dessas ondas compressivas, combinada com as ações das correntes marítimas, pode ocasionar, dentre outros, problemas de flambagem sobretudo na região em que os *risers* tocam o fundo do mar (Fig. 1) e vibrações indesejadas – vibrações induzidas por vórtices (VIV) capazes de reduzir a vida útil dos mesmos.

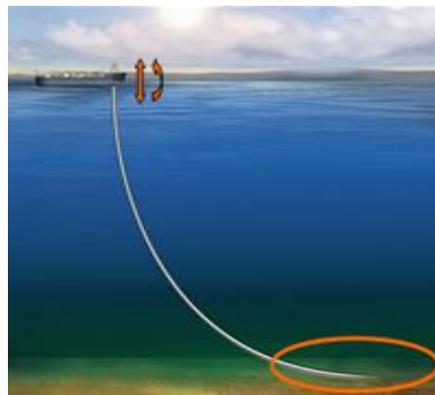


Figura 1. Região de altas tensões sofridas pelo riser (Andrade *et al.*, 2010).

A utilização de configurações geométricas tradicionais de *risers*, tais como a catenária, tem se mostrado inviável, tornando-se necessário o estudo e desenvolvimento de novas alternativas de configurações de *risers* capazes de suportar os esforços impostos à sua estrutura e que sejam ainda economicamente viáveis. Nesse contexto, as indústrias de petróleo vêm desenvolvendo com sucesso configurações complexas de *risers*, tais como Lazy-S, Pliant-Wave, Lazy Wave, Riser Híbrido Autossustentável e a Boia de Subsuperfície (Fig. 2), visando a redução dos efeitos destas ondas compressivas.

No entanto, muitas vezes a aplicação e instalação dessas configurações têm apresentado problemas de logística, tempo e custos elevados. Com o objetivo de se pesquisar uma configuração que permita controlar o problema da flambagem, reduzindo as tensões solicitantes, e cuja aplicação seja de fácil implementação, os *risers* em catenária hidroamortecidos (RCHA) (Mourelle *et al.*, 2010) surgem como uma nova alternativa de projeto.

Por outro lado, nos projetos de engenharia, basicamente, dois princípios fundamentais devem ser considerados: viabilidade técnica e viabilidade econômica, ou seja, o dimensionamento de sistemas estruturais deve atender com segurança aos critérios de operação e, ao mesmo tempo, satisfazer os requisitos econômicos. No contexto da engenharia *offshore*, de acordo com o campo e as condições de operação, existe um grande número de

possibilidades de configuração de *risers* a ser considerado, sob o ponto de vista da viabilidade técnica e econômica. A avaliação de todas essas possíveis configurações na busca pela melhor opção demanda longo tempo e elevado custo computacional. O processo tradicional da escolha de configurações viáveis é baseado em tentativa e erro, no qual a cada tentativa as variáveis do projeto são ajustadas, com base na intuição quanto ao comportamento da estrutura, e a configuração obtida é então avaliada quanto às suas condições operacionais e de integridade estrutural. Seguindo-se essa metodologia, o tempo necessário e a qualidade do projeto final tornam-se extremamente dependentes da experiência do projetista e, portanto, passível de erros. Nesse contexto, o uso de técnicas de otimização passou a ser adotado como uma alternativa para se minimizar o tempo e o custo computacional da procura por configurações viáveis.

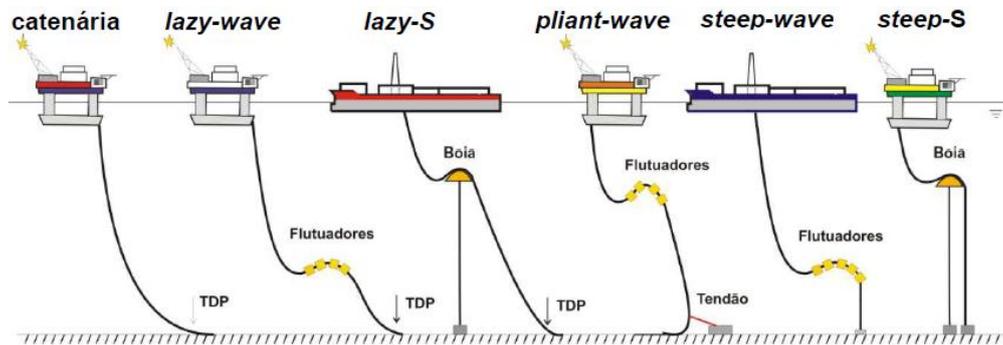


Figura 2. Configurações geométricas adotadas pelos *risers*.

Com o objetivo de superar as dificuldades apresentadas na busca de configurações de *risers* capazes de minimizar os efeitos provocados pelas ondas de compressão ao longo de seus comprimentos e os custos envolvidos na utilização dessas configurações, o presente trabalho aborda a aplicação de técnicas de otimização multiobjetivo no projeto de *risers* em catenária com amortecedores hidrodinâmicos.

2 RISER EM CATENÁRIA COM AMORTECEDORES HIDRODINÂMICOS (RCHA)

O *riser* RCHA (Fig. 3) adota basicamente a mesma configuração de um *riser* em catenária livre, com a diferença de que ao longo dele há segmentos com revestimento de baixa densidade, chamados amortecedores hidrodinâmicos, cuja função principal é interromper a propagação de uma onda compressiva induzida ao longo do *riser* e transmitida pelos movimentos da unidade flutuante à qual o *riser* está conectado. Essa diminuição nas amplitudes das ondas compressivas acarreta uma redução nos níveis de tensões solicitantes, sobretudo nas regiões críticas onde os *risers* entram em contato com o fundo do mar (conhecidas como *Touch Down Zone*, ou *TDZ*) e, conseqüentemente, faz com que os *risers* RCHA ofereçam maior resistência com relação ao fenômeno da flambagem. Além disso, a redução das amplitudes dos movimentos dos *risers*, diminui o efeito provocado pelas vibrações induzidas por vórtices (*VIV*), que se originam com a passagem das correntes marítimas e, com isso, aumenta a vida útil dos *risers* com relação à fadiga.

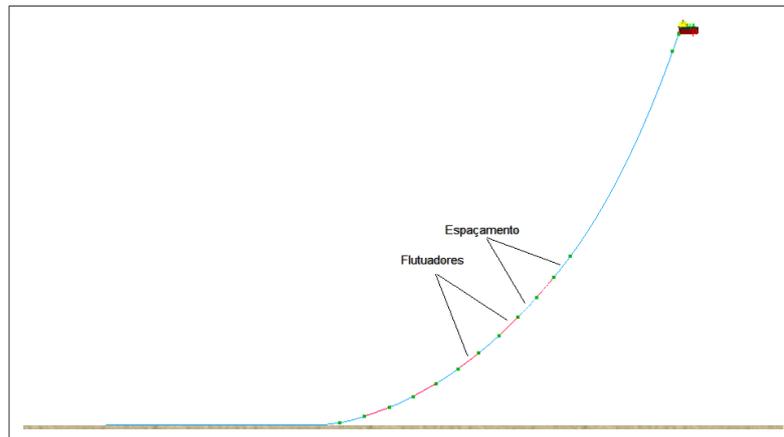


Figura 3. Configuração de riser em catenária com amortecedores hidrodinâmicos.

A composição final do riser RCHA, ou seja, a quantidade de amortecedores, os comprimentos de cada um e os espaçamentos entre eles, depende de diversos fatores, tais como, a intensidade das condições ambientais (ondas, ventos e correntes), a lâmina d'água na região considerada, as propriedades dos materiais que compõem os risers, os custos associados aos amortecedores e ao processo de instalação, dentre outros.

O estudo desse tipo de configuração é relativamente recente na produção de petróleo. Ele ainda não foi instalado e usado na prática, mas estudos recentes indicam sua viabilidade estrutural e econômica (Mourelle et. al, 2010). Portanto, o grande desafio deste trabalho é usar técnicas de otimização para a obtenção de configurações “ótimas” de risers RCHA buscando satisfazer critérios técnicos e econômicos.

3. TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO

No contexto da engenharia *offshore* a otimização pode ser aplicada para se escolher a melhor configuração geométrica de um riser, ou seja, selecionar a configuração que melhor se adequa aos objetivos desejados (por exemplo: minimizar as tensões na região de contato entre o riser e o solo; maximizar a força de tração no topo do riser; minimizar o volume de flutuadores do riser etc.) dentre as diversas soluções ou configurações possíveis do modelo estrutural. Essa escolha é determinada pela funcionalidade que se quer otimizar, representada por uma função objetivo, assim como pelas variáveis de entrada do projeto e pelas restrições que se pretende impor ao problema. Dessa maneira, uma forma usual de se formular um problema de otimização é a seguinte:

Encontrar:

$$\arg \min/\max f_{obj}(x) \quad (1)$$

tal que:

$$g_i(x) \leq 0 \text{ para } i = 1, \dots, n_g \quad (2)$$

$$h_j(x) = 0 \text{ para } j = 1, \dots, n_h \quad (3)$$

$$lb_k \leq x_k \leq ub_k \text{ para } k = 1, \dots, n_x \quad (4)$$

onde f_{obj} é a função objetivo a ser minimizada (ou maximizada); $g_i(x)$ é a i -ésima restrição de desigualdade; n_g é o número de restrições de desigualdade; h_j é a j -ésima restrição de igualdade; n_h é o número de restrições de igualdade; x_k é o k -ésimo elemento do vetor de variáveis de projeto; n_x é o número de variáveis de projeto; e lb_k e ub_k são os limites inferior e superior da variável de projeto x_k , respectivamente. É importante destacar que tanto as restrições de igualdade quanto as de desigualdade são opcionais, ou seja, podem ou não existir em um determinado problema de otimização.

Quando um problema de otimização é representado por uma única função objetivo ele é definido como “mono-objetivo” ou *SOOP* (*single-objective optimization problem*). Nessa classe de problemas, os métodos de otimização, geralmente métodos determinísticos, tentam encontrar uma solução “viável” que represente o mínimo (ou máximo) da função objetivo. Entretanto, há casos em que se procura obter a “melhor resposta” em mais de um aspecto do sistema e, conseqüentemente, atender a vários objetivos simultaneamente. Esse tipo de problema é definido como “multiobjetivo” ou *MOOP* (*multi-objective optimization problem*). Nesses casos, é comum que esses objetivos sejam conflitantes: buscar a melhor resposta do problema em relação a um dado objetivo pode representar uma resposta não tão boa em relação a outros objetivos do problema. A análise deste tipo de problemas é feita por meio de métodos não determinísticos que são aqueles que procuram “imitar” fenômenos ou processos encontrados na natureza e pertencem a uma área denominada de computação natural. Dentre esses métodos, estão os algoritmos genéticos, que são inspirados na teoria da genética e no princípio Darwiniano da evolução das espécies. Os algoritmos genéticos são muito utilizados em problemas multiobjetivos e foram adotados neste trabalho como a ferramenta básica de otimização.

Com base em aplicações bem-sucedidas de problemas multiobjetivos encontradas na literatura técnica (Andrade *et al.*, 2010; Martins, 2011; Oliveira, 2008), o algoritmo genético NSGA II (Deb *et al.*, 2002) foi escolhido neste trabalho para o processo de otimização de configurações de *risers* RCHA.

4. FORMULAÇÃO MATEMÁTICA E IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL

4.1. Formulação matemática

Com relação aos critérios técnicos, que são relacionados ao comportamento estrutural, este trabalho visa obter configurações geométricas de *risers* RCHA capazes de minimizar a distribuição de esforços solicitantes ao longo de sua estrutura ou, equivalentemente, minimizar o nível de tensões atuantes (por exemplo, as tensões de von Mises). Sob o ponto de vista econômico, é importante buscar configurações que minimizem o custo total envolvido, como os custos dos amortecedores e do processo de instalação. Assim, o objetivo é minimizar os comprimentos dos trechos de amortecedores hidrodinâmicos.

Trata-se portanto de um problema multiobjetivo em que se procura minimizar, simultaneamente, as tensões ao longo do *riser* e os comprimentos dos amortecedores. É importante ressaltar que o foco do processo de otimização desenvolvido nesse trabalho será a região crítica TDZ (onde ocorre o contato entre o *riser* e o fundo do mar) e o domínio do problema será o trecho de *riser* compreendido entre a âncora e o seu ponto médio (o que garante que a TDZ estará contida neste domínio).

Variáveis de projeto

O desenvolvimento deste trabalho partiu de um modelo de *riser*, proposto por engenheiros da Petrobras. Trata-se de um *riser* em catenária, composto por 16 segmentos, no qual sua extremidade inferior está conectada à âncora e a superior conectada à unidade flutuante, conforme mostra a Fig. 4.

Os segmentos do *riser*, indicados como flutuadores (ou “Tubo_AH”) na Fig. 4, representam os amortecedores hidrodinâmicos. Esta figura indica ainda quais as variáveis (comprimentos dos segmentos e ângulo de topo) que poderão ter seus valores modificados durante o processo de otimização.

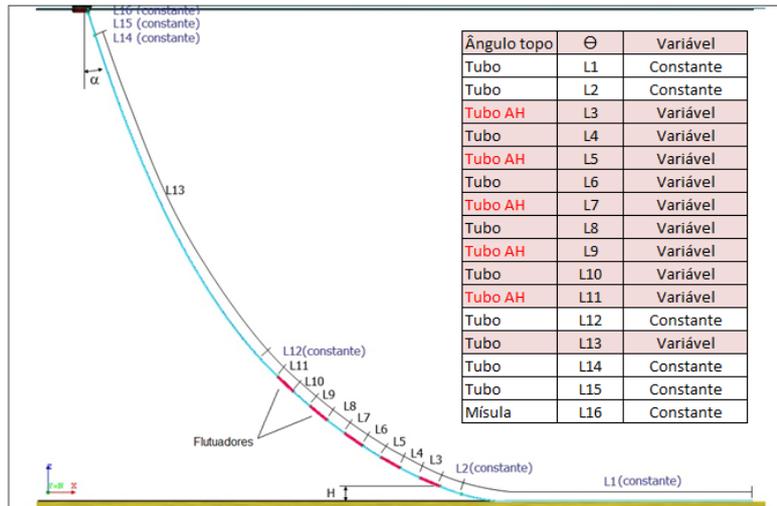


Figura 4. Variáveis de entrada da configuração RCHA.

Para este estudo, serão consideradas as seguintes variáveis de projeto:

1. Θ : ângulo de topo (Ang_Top);
2. L3: comprimento do segmento 3 (material “Tubo AH”);
3. L4: comprimento do segmento 4 (material “Tubo”);
4. L5: comprimento do segmento 5 (material “Tubo_AH”);
5. L6: comprimento do segmento 6 (material “Tubo”);
6. L7: comprimento do segmento 7 (material “Tubo_AH”);
7. L8: comprimento do segmento 8 (material “Tubo”);
8. L9: comprimento do segmento 9 (material “Tubo_AH”);
9. L10: comprimento do segmento 10 (material “Tubo”);
10. L11: comprimento do segmento 11 (material “Tubo_AH”);
11. L13: comprimento do segmento 13 (material “Tubo”).

Funções objetivo

O problema proposto neste trabalho consiste na minimização da variação de amplitude (diferença entre os valores máximos e mínimos) das tensões de von Mises avaliadas ao longo do riser no intervalo de 0 a $L/2$ (onde, nesse intervalo, se localiza a região crítica *TDZ*), assim como a minimização dos comprimentos dos amortecedores. A escolha desses objetivos foi baseada em dois critérios: técnico, ou estrutural, associado à distribuição de tensões ao longo do riser; e econômico, referente ao custo do material, diretamente associado aos comprimentos dos trechos com amortecedores. Como se pode observar, esses objetivos são conflitantes uma vez que ao aumentar os comprimentos dos amortecedores, normalmente ocorre a redução nos valores das tensões atuantes, indicando que se trata de um problema multiobjetivo.

O problema de otimização da configuração do riser RCHA é estudado segundo três abordagens:

i. Minimização das variações de amplitude das tensões de von Mises ao longo do *riser* (problema mono-objetivo ou *SOOP*). Esta variação, representada por “ Δ Von Mises”, é definida como as diferenças entre as tensões máximas e mínimas que atuam sobre o *riser* ao longo de seu comprimento, a saber :

$$f_{obji} = \Delta Von Mises = \min (VonM_{max} - VonM_{min}) \quad (5)$$

ii. Minimização do comprimento dos trechos de amortecedores (problema mono-objetivo ou *SOOP*). O comprimento total dos amortecedores corresponde à soma de todos os trechos de flutuadores (L_{tf}) cujo material é do tipo “Tubo_AH”. A função objetivo é definida por:

$$f_{objii} = L_{tf} = L_3 + L_5 + L_7 + L_9 + L_{11} \quad (6)$$

iii. Minimização das variações de amplitude das tensões de von Mises e dos comprimentos dos amortecedores (problema multiobjetivo ou *MOOP*). A função objetivo pode ser dada como:

$$f_{objiii} = [f_{obji}, f_{objii}] \quad (7)$$

Restrições

Cada configuração gerada ao final do processo de otimização deve atender a certas restrições (ou critérios de engenharia) para que seja considerada como solução viável. As configurações intermediárias, geradas durante os passos de otimização, mas que não satisfaçam esses critérios, são eliminadas no processo. No presente trabalho, as restrições consideradas se baseiam em critérios operacionais e estruturais. Como restrição operacional, define-se a altura mínima (H) do *riser* (Fig. 5). Esta restrição é importante no sentido de evitar que algum trecho de *riser* com flutuadores possa tocar no fundo do mar. Como restrição estrutural, é adotado o fator de utilização da norma DNV-OS-F201 segundo o qual as tensões atuantes devem ter valores inferiores às tensões admissíveis, ou, os valores do coeficiente DNL, avaliados ao longo do *riser*, devem ser inferiores a “1”:

$$DNL = \frac{Von Mises}{Tensão Admissível} < 1 \quad (8)$$

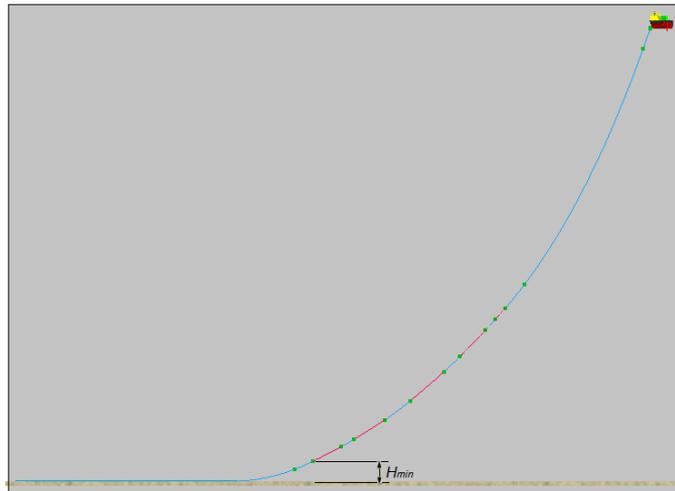


Figura 5. Altura mínima (H) do primeiro trecho com amortecedores.

4.2 Implementação computacional

Para o desenvolvimento deste trabalho foram utilizados dois programas computacionais: um para análise estrutural dinâmica do *riser* (determinação dos deslocamentos, esforços e tensões ao longo do tempo) e outro para o processo de otimização. Para a análise dinâmica, foi utilizado o programa Anflex (Mourelle *et al.*, 2001), desenvolvido pela Petrobras, e que tem como objetivo principal a realização de análises não lineares, estáticas e dinâmicas, nos domínios do tempo e da frequência. O Anflex é baseado no método dos elementos finitos. Para o processo de otimização, foi utilizado o modeFRONTIER (modeFRONTIER, 2011), que consiste em um programa de otimização multidisciplinar no qual estão incorporados diversos métodos de otimização e que também permite o acoplamento com outros programas, por meio de *scripts*. Na área de *offshore*, este programa já foi utilizado, com sucesso, para a otimização de configurações de *risers*, como mostram, por exemplo, Andrade *et al.* (2010) e Martins (2011). Neste trabalho, o Anflex está acoplado ao modeFRONTIER por meio de *scripts*.

Modelagem do problema de otimização

Os principais componentes do fluxo de otimização (também conhecido como *workflow*) desenvolvidos no programa modeFRONTIER estão ilustrados, de forma simplificada, na Fig. 6.

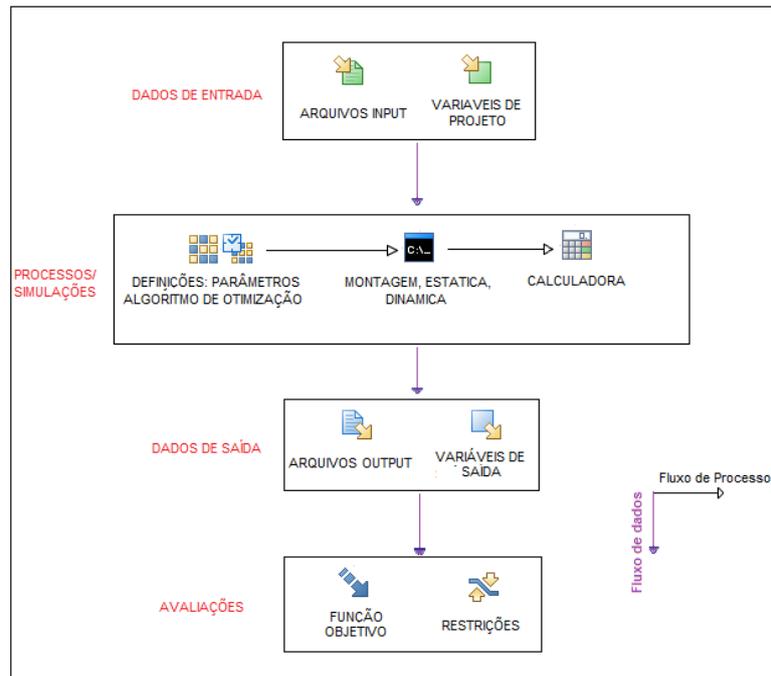


Figura 6. Esquema simplificado do fluxo de otimização no modeFRONTIER.

A modelagem do problema de otimização é definida por dois fluxos principais: o de dados e o de processos. O fluxo de dados, que na Fig. 6 ocorre de cima para baixo, é iniciado com a definição das variáveis de projeto necessárias para o cálculo do equilíbrio de cada configuração, o qual é realizado pelo programa Anflex, acoplado ao modeFRONTIER. Após a simulação da configuração do *riser*, o fluxo de dados segue com a obtenção dos valores das respostas de interesse (ou dados de saída), verificação das restrições e avaliação da função objetivo. Em geral, o fluxo de dados é a sequência lógica que um programa segue para obtenção das respostas de interesse a partir dos dados de entrada.

O fluxo de processos, que na Fig. 6 ocorre da esquerda para a direita, é a sequência lógica de um processo de otimização que se inicia com a definição dos parâmetros de análise de otimização e continua com a busca do ponto mínimo (ou máximo), a partir dos pontos ou respostas de interesse calculadas no fluxo de dados, até que seja atingido um critério de convergência.

5. EXEMPLO DE APLICAÇÃO

Descrição do modelo

Para o desenvolvimento deste trabalho, foi utilizado um modelo de *riser* proposto por engenheiros da Petrobras. Trata-se de um *riser* rígido de aço em catenária, instalado em uma lâmina d'água de 2136.9 m e conectado a uma unidade flutuante do tipo FPSO (*Floating Production Storage and Offloading*). O comprimento total do *riser* é de 4177.93 m e os dados referentes às propriedades físicas do material que o compõe encontram-se resumidos na Tabela 1. Com relação às condições de contorno, a base do *riser* (âncora) é considerada fixa

no fundo do mar enquanto que o seu topo está conectado ao FPSO, ou seja, os movimentos da unidade flutuante são transferidos para o topo do *riser*.

Tabela 1. Propriedades físicas e geométricas do *riser*.

Propriedades	
Diâmetro interno (<i>m</i>)	0.16510
Espessura (<i>m</i>)	0.02362
Módulo de elasticidade do aço (kN/m^2)	2.07e+08
Peso específico do aço (kN/m^3)	77.0
Tensão de escoamento do aço (kN/m^2)	531000.0
Espessura revestimento de baixa densidade (<i>m</i>)	0.195

O modelo utilizado neste trabalho corresponde ao que produziu os piores resultados (maiores valores de tensões ao longo do *riser*) dentre todas as combinações das condições ambientais (ondas e correntes) analisadas pelos engenheiros da Petrobras no estudo de carga extrema desse *riser*. O *riser* é subdividido em 16 trechos (ou segmentos), dos quais 15 são do tipo *Rigid Tube* e o segmento do topo, responsável pela conexão do *riser* à unidade flutuante, é modelado como uma junta flexível (*Flex Joint*) (Tabela 2).

Tabela 2. Segmentos ou trechos que compõem o *riser* em estudo.

Trecho	Tipo	Descrição
1	<i>Rigid Tube</i>	<i>Riser</i>
2	<i>Rigid Tube</i>	<i>Riser</i>
3	<i>Rigid Tube</i>	<i>Riser</i> com amortecedor hidrodinâmico
4	<i>Rigid Tube</i>	<i>Riser</i>
5	<i>Rigid Tube</i>	<i>Riser</i> com amortecedor hidrodinâmico
6	<i>Rigid Tube</i>	<i>Riser</i>
7	<i>Rigid Tube</i>	<i>Riser</i> com amortecedor hidrodinâmico
8	<i>Rigid Tube</i>	<i>Riser</i>
9	<i>Rigid Tube</i>	<i>Riser</i> com amortecedor hidrodinâmico
10	<i>Rigid Tube</i>	<i>Riser</i>
11	<i>Rigid Tube</i>	<i>Riser</i> com amortecedor hidrodinâmico
12	<i>Rigid Tube</i>	<i>Riser</i>
13	<i>Rigid Tube</i>	<i>Riser</i>
14	<i>Rigid Tube</i>	<i>Riser</i>
15	<i>Rigid Tube</i>	<i>Riser</i>
16	<i>Flex Joint</i>	<i>Junta Flexível</i>

Dos 15 segmentos do tipo *Rigid Tube*, 5 correspondem a segmentos com amortecedores hidrodinâmicos. Para se chegar a esta quantidade “ótima” de 5 trechos de *riser* com amortecedores hidrodinâmicos, foram realizados estudos preliminares de otimização considerando-se o mesmo *riser*, porém com uma quantidade de amortecedores variando de 1 a 5. Para todas as configurações estudadas, foi fixado um valor máximo de 1200 m para o comprimento total dos segmentos com amortecedores hidrodinâmicos. Assim, para a configuração com apenas 1 segmento de amortecedores, o comprimento máximo desse segmento será de 1200 m; para a configuração com 2 segmentos, cada um poderá atingir no máximo 600 m; para a configuração com 3 segmentos, o limite máximo para cada comprimento será de 400 m; seguindo o mesmo raciocínio, a configuração com 4 segmentos permitirá um valor máximo de 300 m para cada comprimento; e, finalmente, para a configuração com 5 segmentos de amortecedores cada um terá um comprimento máximo de 240 m. Em todos os casos, o processo de otimização modifica os comprimentos dos segmentos em incrementos discretos de 12 m.

O objetivo desta análise preliminar foi determinar qual dos cinco modelos apresentados conduzirá o *riser* à “melhor” configuração, ou, aquela que minimiza as tensões ao longo do seu comprimento. Para tanto, foi escolhido como parâmetro do processo de otimização a verificação de que o fator *DNL* deve assumir valores menores do que “1” no espaço de busca compreendido entre os comprimentos “0” (âncora) e “L/2” (metade do comprimento do *riser*). Os modelos foram analisados estática e dinamicamente e os resultados das envoltórias de valores máximos do fator *DNL*, correspondentes às configurações “ótimas” de cada modelo, estão ilustrados na Fig. 7.

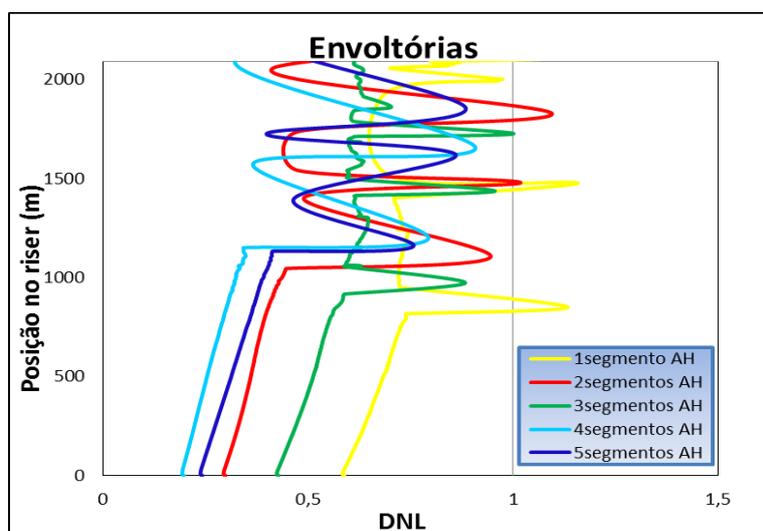


Figura 7. Gráfico comparativo das envoltórias de valores de *DNL*.

Levando-se em consideração os resultados apresentados na Fig. 7, pode-se concluir que apenas os modelos com 4 e 5 trechos de amortecedores hidrodinâmicos foram capazes de satisfazer os critérios estabelecidos, de manter os valores de *DNL* abaixo de 1. Apesar de os resultados destes dois modelos serem próximos, a configuração com 5 trechos de amortecedores hidrodinâmicos foi a que conduziu aos melhores resultados em termos de distribuição de tensões, sendo portanto, a escolhida para o estudo de otimização realizado neste trabalho.

Variáveis de Entrada

As variáveis de entrada do problema de otimização da configuração RCHA são o ângulo de topo do *riser* medido em relação à vertical, os comprimentos dos 5 trechos com amortecedores (*L3*, *L5*, *L7*, *L9* e *L11*), os comprimentos dos trechos de espaçamento entre os amortecedores (*L4*, *L6*, *L8* e *L10*) e o comprimento do trecho superior do *riser* (*L13*). Na Tabela 3 são apresentados os intervalos de variação de cada uma das variáveis descritas anteriormente:

Tabela 3. Variáveis de entrada do exemplo de aplicação.

Variáveis	Valor mín.	Valor máx.
Θ (graus)	6.0	20.0
L1 (m)		1348.93
L2 (m)		100.0
L3 (m)	12.0	240.0
L4 (m)	12.0	240.0
L5 (m)	12.0	240.0
L6 (m)	12.0	240.0
L7 (m)	12.0	240.0
L8 (m)	12.0	240.0
L9 (m)	12.0	240.0
L10 (m)	12.0	240.0
L11 (m)	12.0	240.0
L12 (m)		144.0
L13 (m)	300.0	2400.0
L14 (m)		100.0
L15 (m)		1.0
L16 (m)		3.0

Análise de otimização

São consideradas três diferentes abordagens para a função objetivo: (a) problema mono-objetivo correspondente à minimização das variações de amplitude das tensões de von Mises; (b) problema mono-objetivo correspondente à minimização do comprimento total dos trechos de *riser* com amortecedores hidrodinâmicos; (c) problema multiobjetivo que combina as duas funções objetivo anteriores. Para a solução dos problemas apresentados em cada abordagem, aplica-se o método NSGA-II com população de 20 indivíduos, 10 gerações, probabilidade de cruzamento de 0,9 e probabilidade de mutação de 0,02. Estes parâmetros foram definidos com base em resultados obtidos na literatura técnica (Tanaka, 2009; Martins, 2011; ESTECO, 2011). A população inicial é definida aleatoriamente procurando cobrir, o máximo possível, o espaço de busca.

Comparação entre as abordagens avaliadas

Antes de realizar uma comparação de resultados entre as abordagens avaliadas, é importante comparar os valores de DNL da configuração ótima com amortecedores em cada abordagem com os valores de DNL de uma configuração sem amortecedores. Desta maneira, será possível analisar a viabilidade do uso de risers em catenária com amortecedores hidrodinâmicos.

Na Fig. 8 são apresentados os valores de DNL de um riser em catenária sem amortecedores (Fig. 8a) e os valores de DNL das configurações ótimas obtidas: na primeira abordagem de otimização (Fig. 8b); na segunda abordagem de otimização (Fig. 8c) e na terceira abordagem de otimização (Fig. 8d).

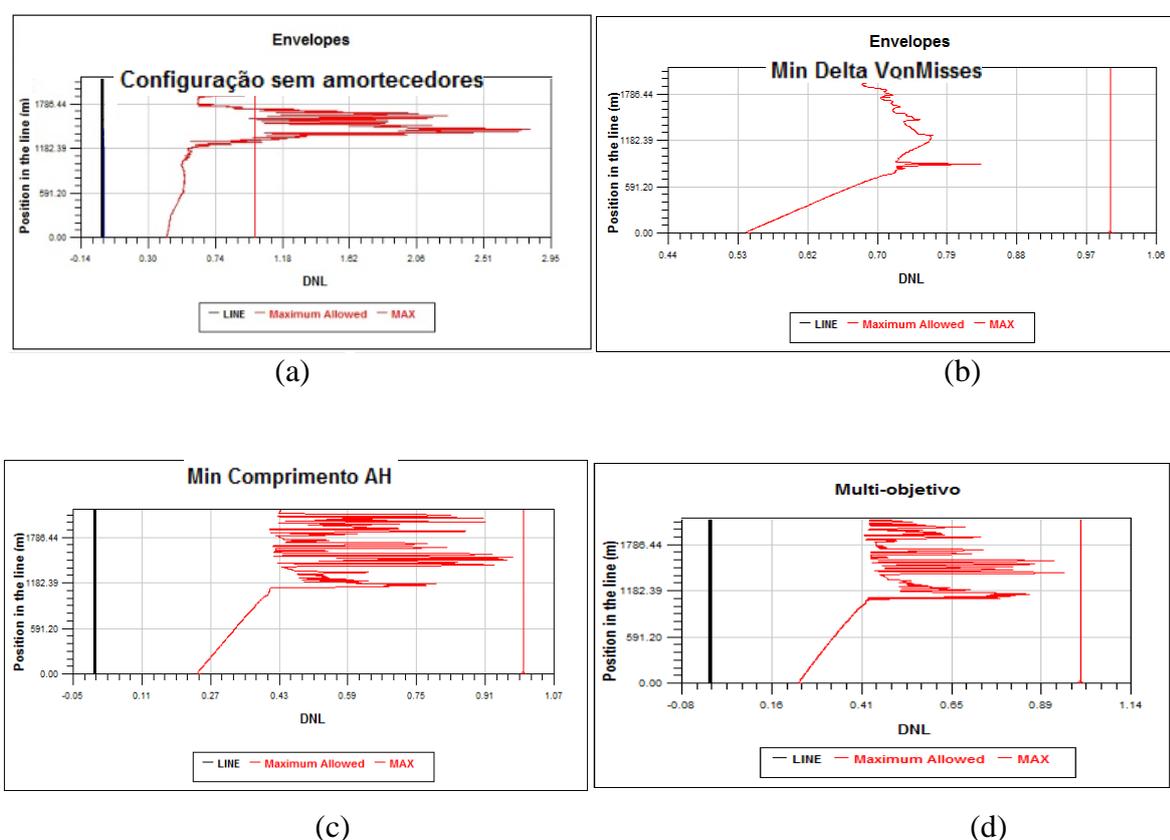


Figura 8. Envoltórias dos fatores DNL da configuração original sem amortecedores e das configurações ótimas referentes à cada abordagem de otimização analisada.

Observa-se que os valores de DNL das configurações ótimas em cada uma das três abordagens são melhores do que os obtidos com a configuração original do riser sem amortecedores hidrodinâmicos. Esses resultados confirmam a viabilidade técnica do uso de risers em catenária com amortecedores hidrodinâmicos (RCHA).

As Tabelas 4 a 8 apresentam os resultados obtidos em cada abordagem de otimização.

Na Tabela 4 são mostradas as percentagens das simulações realizadas que são viáveis, não viáveis ou que apresentaram erro. Para os três casos, a percentagem de configurações não viáveis é superior a 50%, sendo a abordagem do problema multiobjetivo - o terceiro caso analisado - aquela que apresenta um maior número de restrições violadas devido à dificuldade de otimizar duas funções objetivo conflitantes, simultaneamente.

Tabela 4. Resumo dos resultados das simulações por abordagem.

Simulações	Abordagens da otimização		
	Minimizar $\Delta VonMises$	Minimizar Comprimento AH	Multiobjetivo
Viáveis (<i>Feasible</i>)	41.50%	39.00%	32.50%
Não viáveis (<i>Unfeasible</i>)	57.50%	59.50%	64.50%
Error	1.00%	1.50%	3.00%

A Tabela 5 apresenta a proporção de violações das restrições. Para os três casos, a restrição mais violada é a referente ao fator de utilização *DNL*.

Tabela 5. Proporção de violações das restrições por abordagem.

Restrições	Abordagens da otimização		
	Minimizar $\Delta VonMises$	Minimizar Comprimento AH	Multiobjetivo
DNL	96.64%	95.97%	96.27%
Altura mínima H	3.36%	4.03%	3.73%

A Tabela 6 apresenta um resumo dos intervalos de variação dos parâmetros de otimização que correspondem a configurações viáveis depois do processo de otimização. Pode-se concluir que qualquer dado fora desses intervalos vai resultar em uma violação de restrição e, conseqüentemente, em uma configuração não viável. Esses dados são importantes para a definição de faixas de variáveis de entrada (espaço de busca) mais adequadas que permitam encontrar soluções ótimas de forma mais rápida.

Nota-se que os resultados para as três abordagens são muito similares. O ângulo de topo varia entre 9 e 15 graus, as variações de amplitudes das tensões de von Mises estão entre 320000 kN/m^2 e 400000 kN/m^2 , o comprimento total de segmentos com amortecedores hidrodinâmicos varia entre 500 m e 800 m e a altura *H* varia entre 25 m e 120 m. É importante salientar que, quanto maior for o comprimento total de segmentos com amortecedores, maior será a altura *H* resultante, devido ao maior alívio do peso total submerso do *riser*.

Tabela 6. Intervalos de variação dos parâmetros de otimização das configurações viáveis em cada abordagem.

Intervalos dos parâmetros de otimiz.	Abordagens da otimização		
	Minimizar ΔVonMises	Minimizar Comprimento AH	Multiobjetivo
Intervalo Ângulo de topo	[9 , 14]	[11 , 15]	[9 , 14]
Intervalo Δ VonMises	[330000 , 400000]	[320000 , 415000]	[320000 , 400000]
Intervalo Comp. AH	[620 , 800]	[490 , 720]	[520 , 800]
Intervalo Altura H	[30 , 100]	[55 , 120]	[25 , 110]

A Tabela 7 apresenta os valores das variáveis de entrada das configurações ótimas referentes a cada abordagem de otimização estudada anteriormente.

Tabela 7. Variáveis de entrada das configurações ótimas referentes a cada abordagem.

Variáveis de entrada da configuração ótima	Abordagens da otimização		
	Minimizar ΔVonMises	Minimizar Comprimento AH	Multiobjetivo
Ângulo de topo (<i>Ang_top</i>)	14.0	10.0	10.0
Comprimento do segmento três (<i>L3</i>)	96.0	96.0	108.0
Comprimento do segmento quatro (<i>L4</i>)	72.0	132.0	132.0
Comprimento do segmento cinco (<i>L5</i>)	96.0	216.0	216.0
Comprimento do segmento seis (<i>L6</i>)	60.0	84.0	84.0
Comprimento do segmento sete (<i>L7</i>)	216.0	84.0	168.0
Comprimento do segmento oito (<i>L8</i>)	60.0	156.0	60.0
Comprimento do segmento nove (<i>L9</i>)	240.0	48.0	36.0
Comprimento do segmento dez (<i>L10</i>)	36.0	120.0	12.0
Comprimento do segmento onze (<i>L11</i>)	120.0	48.0	36.0
Comprimento do segmento treze (<i>L13</i>)	1484.0	1496.0	1628.0

Finalmente, a Tabela 8 apresenta o ganho percentual do valor da função objetivo ao final do processo de otimização comparado com o valor desta função na configuração inicial (ou semente), antes de iniciar o processo de otimização. Na primeira abordagem, referente à minimização das variações de amplitudes das tensões de von Mises, os valores da função objetivo da configuração inicial e da configuração ótima são, respectivamente, 404440 kN/m^2 e 332640 kN/m^2 , resultando em um ganho de 18%. Na segunda abordagem, referente à minimização do comprimento total dos segmentos amortecidos, os valores da função objetivo avaliados nas configurações inicial e ótima são, respectivamente, 864 m e 492 m, resultando em um ganho de 43%. Finalmente, na terceira abordagem, a multiobjetivo, o valor da primeira função objetivo correspondente às variações de amplitudes das tensões de *von Mises* é de 359370 kN/m^2 , resultando em um ganho de 11% enquanto que o ganho referente à segunda função objetivo (associada à minimização do comprimento total de segmentos amortecidos) é de 35%.

Tabela 8. Ganho percentual do valor da função objetivo durante o processo de otimização.

	<i>Minimizar</i> $\Delta VonMises$	<i>Minimizar</i> <i>Comprimento AH</i>	<i>Multiobjetivo</i>	
			$\Delta VonMises$	<i>Comprimento AH</i>
Configuração inicial	404440	864	404440	864
Configuração ótima	332640	492	359370	564
% Ganho	18%	43%	11%	35%

CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma metodologia para a aplicação de técnicas de otimização na busca da configuração ótima de *risers* em catenária com amortecedores hidrodinâmicos (RCHA). O processo de otimização foi modelado no programa modeFRONTIER (modeFRONTIER, 2011) que, acoplado ao Anflex (Mourelle *et al.*, 2001), permitiu obter as configurações desejadas. Foram consideradas as análises estáticas e dinâmicas dos *risers* submetidos a condições ambientais extremas de ondas e correntes marítimas.

Ressalta-se que o estudo aqui realizado representa uma pré-análise e não um dimensionamento completo do *riser*. Seu objetivo principal foi demonstrar a aplicabilidade das técnicas de otimização no projeto de *risers*.

Inicialmente, foram realizados vários experimentos variando-se o número de trechos com amortecedores hidrodinâmicos, de um até cinco, para assim escolher a “melhor” configuração geométrica, a saber, aquela que minimiza as tensões ao longo do *riser*. A configuração com cinco trechos de amortecedores foi a que apresentou os melhores resultados. Em seguida, com esta configuração, foram realizadas três abordagens de otimização, considerando objetivos diferentes: na primeira, o objetivo foi minimizar a variação de amplitude (diferença entre os valores máximos e mínimos) da tensão de von Mises; na segunda, o objetivo foi minimizar o comprimento total de trechos com amortecedores hidrodinâmicos; e, finalmente, na terceira análise, procurou-se minimizar simultaneamente os dois primeiros objetivos. O aumento do comprimento dos trechos com amortecedores provoca uma redução nos valores das tensões ao longo do *riser*, ou seja, esses objetivos são conflitantes e, portanto, essa terceira abordagem representou a solução de um problema multiobjetivo. Em todas as análises de otimização foi utilizado o algoritmo genético NSGA-II, disponível no programa modeFRONTIER.

Na primeira abordagem, foi obtida uma configuração geométrica capaz de reduzir em 18% as variações de amplitude das tensões de von Mises. Na segunda abordagem, foi obtida uma configuração capaz de satisfazer as restrições de projeto e minimizar em 43% o comprimento total de trechos com amortecedores hidrodinâmicos, reduzindo consideravelmente o custo total (material e instalação) do *riser*. Finalmente, na abordagem multiobjetivo, foi obtida uma configuração “ótima” com uma redução de 11% nas variações de amplitude das tensões de von Mises e 35% no comprimento total dos trechos de amortecedores hidrodinâmicos.

É importante salientar que, de acordo com as características de um problema multiobjetivo, durante a terceira abordagem foram obtidas diversas soluções satisfatórias. Nesses casos, caberá ao projetista definir os critérios para a escolha de uma única solução, ou,

aquela que contemplará a configuração “ótima”. Como o foco principal deste trabalho foi o estudo da região crítica de contato entre o riser e o fundo do mar (*Touch Down Zone*, ou TDZ), o domínio do problema foi limitado ao trecho do riser compreendido entre a âncora e a metade de seu comprimento.

Em síntese, este trabalho demonstrou a importância do uso de técnicas de otimização multiobjetivo em projetos de risers, auxiliando o projetista na escolha de configurações “ótimas”, em um universo de incontáveis possibilidades de configurações devido ao grande número de variáveis de projeto. Os resultados obtidos confirmam a viabilidade técnica do uso de risers em catenária com amortecedores hidrodinâmicos (RCHA).

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Tecgraf / PUC-Rio (Grupo de Tecnologia em Computação Gráfica) pela infraestrutura que possibilitou o desenvolvimento deste trabalho. Giovanni A.R.N. agradece à CAPES pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

- Andrade, E.Q., Aguiar, L.L., Senra, S.F., Siqueira, E.F.N., Torres, A.L.F.L., Mourelle, M.M., 2010. Optimization procedure of steel lazy wave riser configuration for spread moored FPSOs in deepwater offshore Brazil. OTC 20777-PP. *Offshore Technology Conference, Houston*, 3-6/maio/2010.
- Deb, K. *et al.*, 2002. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, v. 6, n. 2, pp. 182-197.
- ESTECO, 2011. *Modefrontier 4 – User manual*.
- Martins, M.A.L., 2011. Otimização da configuração de risers verticais complacentes. Dissertação de mestrado. Departamento de Engenharia Civil. Maceió: Universidade Federal de Alagoas.
- modeFRONTIER, 2011. *The Multi-objective Optimization and Design Environment*. Versão 4.4.
- Mourelle, M.M., Gonzalez, E.C., Siqueira, M.Q., 2001. *Manual Teórico do Programa Anflex*, Relatório RL064-2001, CENPES/PDP/MC.
- Mourelle, M.M; Aguiar, L.L; Menezes, I.F.M., 2010. Solicitação de Patente: “*Amortecedor Hidrodinâmico para Tubo Ascendente em Catenária*”, Petrobras.
- Oliveira., 2008. Offshore Platforms Sizing Optimization through Genetic Algorithms, *Deep offshore technology conference - DOT*, Perth, Australia.
- Tanaka, R.L., 2009. Otimização da Configuração de Risers Rígidos. *Tese de Doutorado*, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo: Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos.