

6 Conclusões e Sugestões

Neste trabalho é apresentada uma formulação co-rotacional e os testes numéricos, de um elemento de viga para a análise não-linear geométrica tridimensional, estática e dinâmica, de linhas marítimas de Materiais com Gradação Funcional (MGF) onde as propriedades físicas variam ao longo da espessura da seção tubular do *riser*. Na discretização espacial das equações de equilíbrio, a linha marítima foi representada usando-se o modelo de viga de Euler-Bernoulli de dois nós com doze graus de liberdade conferindo propriedades de rigidez axial, flexional e de torção. A formulação co-rotacionada foi utilizada como descrição cinemática, com o objetivo de avaliar o comportamento não-linear geométrico de diversas configurações estruturais da seção tubular, resultado de grandes deslocamentos e rotações, mas com pequenas deformações.

A gradação funcional do material foi introduzida na equação de equilíbrio dinâmica incremental, na forma matricial, através das matrizes constitutiva e de inércia, assumindo-se uma variação para o módulo de elasticidade e a massa específica do material prescritos na forma de lei de potência. Esta variação radial confere à modelagem do MGF uma simplicidade que permite a obtenção em forma fechada das matrizes de rigidez e de inércia, reduzindo significativamente o esforço computacional associado à integração numérica. Os coeficientes das leis de potência para o módulo de elasticidade e massa específica da liga de MGF TiC-Ni₃Al usado nos exemplos numéricos foram obtidas usando uma aproximação por mínimos quadrados dos dados experimentais fornecidos por Yin et. al [98], verificou-se que este procedimento reproduz com boa aproximação os dados experimentais podendo ser estendido a outras ligas de MGF.

A metodologia descrita acima foi implementada no programa de elementos finitos ANFLEX desenvolvido para a análise da dinâmica tridimensional de *risers*. A validação do modelo proposto com a avaliação dos resultados numéricos foram realizadas através de análises comparativas com outros resultados

numéricos ou em procedimentos analíticos, que comprovam a eficácia do modelo numérico proposto, na simulação geral de linhas marítimas 3D com MGF.

Em um estudo utilizando a Formulação Lagrangeana Total (modelo de Pacoste e Eriksson [61]), foi possível mostrar que vigas esbeltas de MGF podem ser representadas associando-se à seção transversal através de rigezas equivalentes às deformações axiais, ao cisalhamento e à flexão bem como a distribuição de tensões analíticas considerando-se a seção reta retangular obtida a partir de conceitos básicos da mecânica de sólidos para a determinação da posição do eixo neutro. Também, o emprego de uma camada de MGF em vigas com dois materiais permite uma distribuição suave de tensões evitando desta forma a ocorrência de fenômenos indesejáveis como a delaminação que ocorre em vigas de materiais compósitos.

Em dois exemplos considerados de resposta estática apresentados na seção 5.1.2 para vigas de seção tubular usando a Formulação Co-rotacionada as vigas com gradação funcional – exemplos 5.1.2.2 e 5.1.2.4 – apresentaram uma diferença substancial na distribuição de tensões quando comparados com as soluções obtidas com uma viga homogênea de mesma rigidez. Também é mostrado que dependendo da lei de potência a distribuição de tensões muda ao longo da espessura da seção tubular como pode ser observado ao colocar as fases de TiC e Ni₃Al nos raios externo e interno, respectivamente num caso e invertendo as fases no outro.

No exemplo dinâmico, correspondente à análise de frequências, observa-se que a variação da espessura da camada de MGF na viga tubular de seção compósita afetou as frequências na vibração livre onde os fatores de amplificação entre as frequências naturais consecutivas que variam de 6.27 a 1.66 para o caso da viga em balanço e 3.24 a 1.53 para o caso de viga hiperestático engastada-apoiada. Esta larga margem permite que, diferentes projetos com MGF possam ser usados com o objetivo de obter-se variações significativas nas frequências naturais.

As aplicações 5.2.2, 5.2.4 e 5.2.5 da formulação nas análises dinâmicas tiveram uma muito boa concordância quando comparada com soluções numéricas obtidas por outros autores. No caso do exemplo 5.2.6 referente ao *riser* rígido em catenária observa-se que o uso do MGF na região crítica próxima ao TDP mudou a resposta dinâmica do *riser*, reduzindo significativamente os esforços de flexão

nessa região crítica, portanto ficou demonstrado que a aplicação dos MGF em configurações de *risers* pode contribuir para melhorar seu comportamento dinâmico e ser uma boa alternativa de uso em condições operacionais adversas.

6.1. Sugestões para trabalhos futuros

Dentro da linha de pesquisa seguida neste trabalho, e a partir dos resultados obtidos até o presente, algumas sugestões para trabalhos futuros são enumeradas, visando abordar aspectos complementares ao presente trabalho:

- De forma a estender a aplicabilidade do modelo de pórtico de MGF desenvolvido neste trabalho a estruturas de seção tubular em geral, há a necessidade de considerar-se na formulação do elemento os efeitos das deformações devidas ao cisalhamento transversal relevantes nas condições em que a relação diâmetro/comprimento se afasta da condição de uma viga esbelta.
- Apesar de haver sido considerada nos desenvolvimentos apresentados no capítulo 3, a matriz de inércia consistente para MGF incluindo o efeito da inércia de rotação, não foi considerada nos exemplos apresentados. Desta forma, carecendo de que testes numéricos sejam realizados de forma a avaliar os efeitos da matriz de inércia consistente nos resultados numéricos.
- No estudo do elemento de pórtico para *risers* flexíveis geralmente o modelo com múltiplas camadas é necessário. Neste caso, a transição entre as camadas pode ser feita empregando-se MGF, conforme mostrado nos dois exemplos da seção 5.1.1. Também é recomendável fazer-se testes numéricos de MGF em outras configurações de *risers*, por exemplo, nas configurações *lazy-wave* e *lazy-s* que por permanecerem apoiadas em catenária no fundo do mar são suscetíveis a compressão dinâmica no TDP, desta forma permitindo avaliar melhor seu desempenho sobretudo nas regiões críticas que apresentem esforços elevados, como no caso do exemplo mostrado em 5.2.6.
- Devido a ocorrência de tensões elevadas associadas à resposta dinâmica de *risers* em operação há a necessidade de incluir-se na formulação um modelo constitutivo elasto-plástico para o MGF utilizando os critérios de Tresca ou Von Mises, com a finalidade de acompanhar a evolução do estado de tensões

nas regiões críticas do *riser* e considerar-se os efeitos do endurecimento do material.

- O acoplamento entre seções de *riser* de material convencional e de MGF não está disponível na literatura. Assim, há a necessidade de considerar-se os meios de fixação definindo-se, por exemplo, em *risers* rígidos a técnica e o material da solda mais adequados, verificando-se a ocorrência de fadiga na solda, questão crítica especialmente na região do *riser* próxima ao TDP.
- Considerar as vibrações induzidas por vórtices (VIV), as quais ocorrem em configurações de *risers* com a ação da correnteza. Estas tem um efeito importante na resposta dinâmica do *riser*, tendo como consequência estrutural o aumento do esforço de arrasto no *riser* e também a diminuição da vida a fadiga do *riser*.
- A fim de atender às demandas presentes na produção do pré-sal brasileiro, como a corrosão em virtude dos altos teores de CO₂ e H₂S produzidos deve-se aprofundar os estudos experimentais em ligas de MGF para selecionar a melhor combinação metal-cerâmica que possa ser usada em *risers*.
- Estudar o fenômeno de transferência de calor ao longo do *riser* tendo em conta que no leito marinho o óleo pode ter uma temperatura da ordem dos 90°C e no leito do mar sob uma lâmina d'água de 3 mil metros a temperatura da água é de 4°C. O esfriamento rápido do petróleo provoca a formação de parafinas que obstruem as tubulações, portanto é importante o estudo deste fenômeno considerando o uso de MGF.