

DIFERENTES ESTRATÉGIAS DE MOVIMENTAÇÃO E REDEFINIÇÃO DE MALHAS NÃO-ESTRUTURADAS NO TRATAMENTO DE PROBLEMAS DE INTERAÇÃO FLUIDO-ESTRUTURA

Alessandro R. Echevarria Antunes

Departamento de Engenharia Mecânica – UFPE
Av. Acadêmico Hélio Ramos, S/N, Recife/PE,
CEP 50740-530 – Brasil
aantunes@demec.ufpe.br

Darlan K. Elisiário de Carvalho

Departamento de Engenharia Mecânica – UFPE
Av. Acadêmico Hélio Ramos, S/N, Recife/PE,
CEP 50740-530 – Brasil
darlan@demec.ufpe.br

Paulo R. Maciel Lyra

Departamento de Engenharia Mecânica – UFPE
Av. Acadêmico Hélio Ramos, S/N, Recife/PE,
CEP 50740-530 – Brasil
prmlyra@demec.ufpe.br

Resumo. No presente trabalho, são tratados problemas de acoplamento fluido-estrutural, especificamente o estudo de vibrações induzidas por fluxos de fluido, onde uma estrutura rígida interage com o escoamento fluido que é modelado como incompressível. Utiliza-se um procedimento do tipo Petrov-Galerkin do método dos elementos finitos para a discretização espacial das equações de Navier-Stokes incompressíveis descritas em uma formulação mista “ALE” (Arbitrary Lagrangean Eulerian). A estrutura em estudo consiste num cilindro circular rígido suportado por molas elásticas. Explora-se o fato de o gerador de malhas não-estruturadas utilizado, permitir a definição prévia de múltiplos domínios onde as malhas podem ser geradas de forma independente e consistente, além da capacidade do mesmo de gerar malhas com elementos alongados nas regiões de camada limite. A existência de múltiplos subdomínios possibilita o uso de diferentes estratégias no tratamento dos mesmos, onde são utilizadas as diferentes formulações (ALE com e sem deformação da malha e Euleriana), o que leva a implicações tanto do ponto de vista de precisão como de eficiência computacional. Nos subdomínios com formulação ALE, com malha dinamicamente deformável, quando a qualidade dos elementos da malha estiver deteriorada, exploramos a flexibilidade do gerador utilizado, o qual permite a redefinição global ou a redefinição local da malha (“Global” ou “Local Remeshing”) ao longo dos diversos subdomínios. Os procedimentos apresentados são utilizados na solução de problemas modelo envolvendo o deslocamento de um cilindro circular imerso num escoamento líquido com o objetivo de demonstrar as diversas características das estratégias e procedimentos desenvolvidos.

Palavras chave: Interação Fluido-Estrutura, ALE, Malha Dinâmica, Redefinição Global e Local de Malhas

1. Introdução

No estudo de problemas envolvendo fronteira móvel o domínio computacional se modifica a cada intervalo de tempo e uma nova discretização deste domínio se faz necessária a cada novo instante. A geração de uma nova malha a cada novo intervalo de tempo é computacionalmente inviável, além de introduzir erros associados às interpolações de dados inerentes a este processo e que podem comprometer a precisão dos resultados. A alternativa mais adequada e popular consiste na utilização de uma descrição “ALE” cujo objetivo é garantir a qualidade da malha num maior intervalo de tempo possível, reduzindo assim o número de gerações de malha e interpolações, reduzindo as desvantagens associadas a este processo. A implementação da formulação “ALE” das equações de Navier-Stokes requerem, além da introdução de termos adicionais no modelo numérico, estratégias de movimentação e redefinição de malhas.

Neste trabalho a formulação “ALE” do método dos elementos finitos apresentada em Antunes & Lyra (2002) é utilizada em conjunto com diversas técnicas de geração/adaptação e movimentação de malhas para a análise de problemas de interação fluido-estrutura. Considerando desprezíveis as deformações que a estrutura sofre, quando comparadas com os deslocamentos a que ela é submetida, a mesma é modelada através das equações da dinâmica de um corpo sólido rígido. Uma atenção especial é dada em relação às inúmeras estratégias implementadas no nosso sistema geração/adaptação de malhas (Carvalho, 2001; Lyra & Carvalho, 2000) que podem ser exploradas no estudo de problemas envolvendo fronteira móvel e uma descrição “ALE” das equações da dinâmica dos fluidos. Dentre estas

estratégias, destacamos a possibilidade da construção de malhas não-estruturadas consistentes em múltiplos domínios, a utilização da técnica do avanço em camadas, que permite a geração de elementos alongados nas regiões próximas à paredes sólidas, e a possibilidade de se utilizar o sistema de geração de malhas em um procedimento adaptativo, onde a malha é refeita para atender a um critério (análise de erros ou qualidade da malha) que controla o processo. Neste artigo diversos testes são analisados envolvendo um cilindro circular que se desloca no interior do domínio. Em seguida analisamos um problema de interação fluido-estrutura onde é imposto um movimento oscilatório ao cilindro é estudado o comportamento do escoamento externo sobre o cilindro. Neste exemplo a característica e importância das estratégias de movimentação e redefinição de malhas, bem como decomposição em múltiplos domínios com diferentes descrições (“ALE” com e sem deformação da malha e Euleriana) são realçadas. Para um estudo bastante detalhado do estudo do fenômeno de “lock-in” imposto um cilindro em movimento (Correia, 2001; Mendes & Branco, 1999), com pequenos deslocamentos e utilizando o nosso procedimento do método dos elementos finitos, recomendamos, Antunes & Lyra (2002). Para maiores informações sobre as diferentes alternativas para lidar com a malha dinâmica, ver Azevedo et al (2002).

2. Equações Governantes

Para resolver problemas onde uma estrutura interage com um fluido é necessário que as equações governantes do problema sejam capazes de captar fenômenos que estão associados a domínios móveis e deformáveis. Então é preciso descrever as equações governantes em uma formulação que permita variações em sua configuração. Em alguns tipos de problemas de interação fluido-estrutural, onde a estrutura se encontra imersa em um fluido, as deformações são desprezíveis quando comparadas com os deslocamentos a que estão submetidas. Desta forma o modelo estrutural empregado é o de um sólido rígido, ou seja, indeformável.

Considere um domínio Ω , onde podem ser definidos os seguintes subdomínios, $\Omega_E(t)$ é o domínio ocupado por um corpo rígido em Ω , e $\Omega_F(t)$ é a parte do domínio onde está definido o problema fluido e I representa o intervalo de tempo de interesse $[0, T]$. Desta forma as equações de conservação podem ser escritas em uma descrição arbitrária Lagrangeana-Euleriana, onde $\Gamma_C(t)$ representa a interface entre $\Omega_E(t)$ e $\Omega_F(t)$. Como o corpo rígido muda sua posição, a interface $\Gamma_C(t)$ move-se de acordo com o movimento do corpo rígido. Supondo que seja possível especificar de alguma forma a distribuição da velocidade da malha computacional w_i , é possível obter uma descrição “ALE” das equações de Navier-Stokes para escoamentos incompressíveis, que governam o movimento do fluido, (Hughes & Nomura, 1992; Mendes & Branco, 1999), conforme dado pela Eq. (1).

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho (u_j - w_j) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + f_i \quad \text{em} \quad \Omega_F(t) \times I \quad (1)$$

Sob uma restrição de incompressibilidade,

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad \text{em} \quad \Omega_F(t) \times I \quad (2)$$

Nas equações acima, ρ e u_i são a densidade e o vetor velocidade do fluido, respectivamente, e w_i é o vetor velocidade da malha computacional. Ainda nas equações acima, τ_{ij} é o tensor de tensões e f_i é o vetor das forças de corpo. Seja p a pressão e μ a viscosidade dinâmica, o tensor de tensões pode ser escrito como,

$$\tau_{ij} = -p \delta_{ij} + \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

O problema é definido pelas equações (1) a (3) em um domínio Ω , com contorno Γ , contido no espaço euclidiano n -dimensional. Não foram consideradas forças de corpo, logo $f_i = 0$. As variáveis dependentes, velocidade e pressão, são dadas por u_i e p , respectivamente. O modelo fica completo introduzindo-se condições de contorno e inicial. Condições de contorno de velocidade e tensões de superfície (ou “tractions”) são dadas por \bar{u} e \bar{t} . Elas são prescritas nas partes do contorno Γ_u e Γ_t , tal que $\Gamma_u \cup \Gamma_t = \Gamma$ e $\Gamma_u \cap \Gamma_t = O$. Condições de contorno de pressão e fluxo de massa estão associadas ao balanço de massa e são dadas por \bar{p} e \bar{G} nas partes do contorno Γ_p e Γ_G , tal que $\Gamma_p \cup \Gamma_G = \Gamma$ e $\Gamma_p \cap \Gamma_G = O$, onde $G = \rho u_i n_i$, com n_i representando o vetor normal ao contorno Γ .

Neste trabalho, a estrutura é considerada rígida, portanto não há deformações, havendo apenas deslocamentos. Sendo assim, o modelo estrutural é matematicamente descrito pela equação abaixo:

$$\mathbf{M} \frac{d^2 \boldsymbol{\varphi}}{dt^2} + \mathbf{C} \frac{d\boldsymbol{\varphi}}{dt} + \mathbf{K}\boldsymbol{\varphi} = \mathbf{F} \quad \text{em} \quad \Omega_E(t) \times I \quad (4)$$

onde \mathbf{M} é a matriz de massa, \mathbf{C} é a matriz de amortecimento viscoso, \mathbf{K} é a matriz de rigidez, \mathbf{F} é o vetor das forças aplicadas, e $\boldsymbol{\varphi}$ é o vetor dos deslocamentos. O problema de valor inicial para a equação acima consiste em encontrar o deslocamento $\boldsymbol{\varphi} = \boldsymbol{\varphi}(t)$, satisfazendo a Eq. (4), dadas as seguintes condições iniciais,

$$\boldsymbol{\varphi}(0) = \boldsymbol{\varphi}^0 \quad \text{e} \quad d\boldsymbol{\varphi}/dt|_{t=0} = \mathbf{v}^0 \quad (5)$$

onde $\boldsymbol{\varphi}_i^0, \mathbf{v}_i^0$ são o deslocamento e a velocidade inicial, respectivamente.

3. Modelo Discreto

O modelo fluido contínuo é discretizado usando elementos triangulares lineares tanto para aproximar velocidade quanto pressão. Trata-se, portanto, de uma formulação estabilizada do Método dos Elementos Finitos, onde não é necessário fazer referência à condição de estabilidade de Babuska-Brezzi (Brooks & Hughes, 1982 e Sampaio, 1991). As equações de balanço da quantidade de movimento discretizadas são obtidas pela aplicação da formulação discreta de mínimos quadrados, minimizando com relação aos graus de liberdade de velocidade e pressão. A equação da pressão-continuidade é obtida da combinação de mínimos quadrados com a condição de incompressibilidade.

O problema é resolvido utilizando um procedimento de solução segregado. A pressão é computada primeiro, então o campo de velocidade é atualizado. As equações discretizadas formam matrizes simétricas positivas definidas, mesmo utilizando-se uma descrição mista Euleriana-Lagrangeana, permitindo o uso de um método iterativo de solução do tipo gradientes conjugados com pré-condicionador para resolver os sistemas algébricos resultantes. Para maiores detalhes ver referências (Sampaio, 1991 e Sampaio et al 1999), onde a mesma formulação e técnicas foi empregada para problemas sem fronteira móvel. O problema fica completo inserindo-se algum método para resolver o problema estrutural. No presente trabalho optou-se por utilizar o método da aceleração média constante, também conhecido como regra trapezoidal, que é o caso ótimo do esquema de integração de Newmark. Tal método é incondicionalmente estável e por esta razão foi escolhido para ser utilizado neste trabalho, uma vez que o intervalo de tempo Δt adotado é proveniente do problema fluido.

Segue abaixo um pseudo-algoritmo do programa para a solução do problema acoplado, e que se baseou no procedimento proposto por (Blom et al 1998):

1. Gerar modelo discreto inicial (malha, condições de contorno e iniciais);
2. Enquanto $t < t_{\max}$ (t_{\max} = tempo máximo da análise):
 - 2.1. Estimar velocidade da estrutura (v_{preditor});
 - 2.2. Mover estrutura e malha no domínio computacional;
 - 2.3. Se qualidade da malha igual a RUM;
 - 2.3.1. Realizar redefinição de malha;
 - 2.3.2. Interpolador dados entre as malhas;
 - 2.4. Equacionar o escoamento fluido;
 - 2.5. Resolver o problema estrutural (determinando v_{corretor});
 - 2.5.1. Se $|v_{\text{preditor}} - v_{\text{corretor}}| > \text{tol}$ então:
 - 2.5.1.1. $v_{\text{preditor}} = v_{\text{corretor}}$
 - 2.5.1.2. Retornar ao passo 2.2;

O cálculo da velocidade da estrutura na etapa preditora é feito utilizando-se uma extrapolação linear da mesma dada por:

$$v^{n+1} = 2v^n - v^{n-1} \quad (6)$$

Os procedimentos e técnicas adotados na geração e redefinição das malhas, assim como, as estratégias que definem a dinâmica da malha serão apresentadas nas próximas seções.

4. Geração de Malhas Triangulares Não-Estruturadas em 2-D

A geração de malhas em 2-D é realizada utilizando-se um gerador de malhas não-estruturadas triangulares baseado na técnica do Avanço de Frente (Peraire et al, 1999). Nesta técnica, nós e elementos são criados simultaneamente de acordo com espaçamentos nodais e direções de alongamento que são fornecidos através de uma malha de fundo

grosseira (Background Mesh) que recobre todo o domínio. Diversas modificações foram introduzidas no programa original para que tivéssemos a flexibilidade de lidar com múltiplos subdomínios, malhas anisotrópicas e malhas em regiões de camada limite (Carvalho, 2001). Alguns algoritmos de otimização da qualidade da malha foram introduzidos especialmente para o tratamento das malhas anisotrópicas com o objetivo de minimizar o número de elementos com elevado grau de distorção e cuja qualidade podem comprometer a análise numérica (Lyra & Carvalho 2000).

4.1. Geração Independente de Malhas Sobre Múltiplos Subdomínios

Sempre que tratamos problemas acoplados (ex. problemas envolvendo interações fluido-estrutura), escoamentos multifásicos imiscíveis e certos problemas de mecânica dos sólidos em que materiais de diferentes propriedades são tratados em diferentes porções do domínio, precisamos construir malhas adequadas para cada parte deste domínio. Dentre as modificações implementadas no gerador de malhas triangulares, está a capacidade de gerar malhas consistentes, sobre múltiplos subdomínios. Esta flexibilidade foi introduzida através da triangulação independente de cada subdomínio, mantendo-se, é claro, a consistência entre as malhas nas interfaces entre os diferentes subdomínios. Isto nos permitiu definir previamente as regiões do domínio onde foram utilizadas, as diferentes formulações para a análise do problema acoplado fluido-estrutura, conforme mostrado na Fig (1).

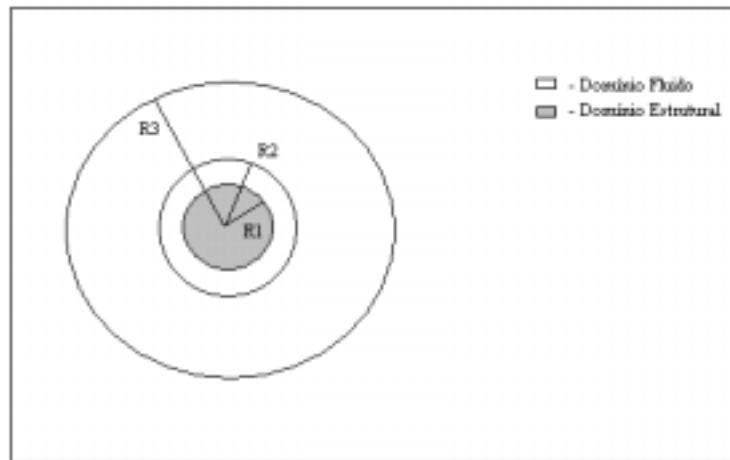


Figura 1. Decomposição do domínio em subdomínios.

Na região definida por $R1 =$ raio do cilindro, e que representa o corpo sólido, utiliza-se uma descrição Lagrangeana. Na região definida por $(R2-R1)$, os elementos têm deslocamento idêntico ao do cilindro, tem-se, desta forma, uma opção para que não haja deformação dos elementos próximos ao cilindro em uma pequena região do domínio, que utiliza uma descrição "ALE" sem deformação da malha. Isto evita que haja deformação dos elementos no interior da camada limite, onde se necessita de uma melhor qualidade dos elementos da malha computacional, pois os efeitos de viscosidade são importantes nesta região. Define-se ainda o subdomínio $(R3-R2)$ como a parte do domínio onde é utilizada a descrição "ALE", onde há deformação dos elementos devido à movimentação da malha em função do movimento do cilindro. No restante do domínio é empregada uma descrição Euleriana, isto é, não há movimento da malha computacional. Uma economia computacional adicional é obtida com a utilização destas múltiplas regiões, haja vista a necessidade de menos reconstrução de malhas com a introdução da região $(R2-R1)$ e de re-avaliação das matrizes dos elementos apenas nas regiões $(R2-R1)$ e $(R3-R2)$ onde as mesmas se modificam. Tem-se a flexibilidade de variar os raios $R2$ e $R3$, configurando-se apenas uma região (se $R2=R1$ e $R3 \equiv$ contorno do domínio), duas regiões (se $R2=R1$ e $R3 \neq$ contorno do domínio), ou três regiões como mostra a Fig. (1), esta figura representa apenas um esboço da flexibilidade de se definir múltiplos subdomínios, valendo destacar que estes podem ter formas quaisquer e que no caso do cilindro circular a forma circular é naturalmente mais adequada.

4.2. Malhas Não-Estruturadas em Regiões de Camada Limite

A estratégia que adotamos para a obtenção de malhas alongadas (reconhecidamente as mais adequadas à solução destes problemas nas regiões próximas às paredes sólidas) nas regiões de camada limite consiste na utilização da técnica conhecida por "Avanço em Camadas" (Advancing Layers), com a qual se obtém malhas com elementos alongados nas adjacências de contornos sólidos. Este método foi apresentado por Hassan et al (1991) e posteriormente desenvolvido e estendido para três dimensões em Hassan et al (1996). Nesta técnica são utilizados, o método do avanço de frente e uma função padrão de controle da malha para a criação de elementos com fator de alongamento elevado (i.e. elementos muito alongados numa direção específica que é ditada pela direção da parede sólida neste caso). Tem-se, deste modo, uma malha otimizada para a resolução da camada limite.

Através da técnica do avanço de frente, uma camada de elementos é produzida adjacente aos componentes da geometria que representam paredes sólidas. Assim que todos os elementos desta camada são formados Fig. (2a), os pontos que não pertencem à fronteira são movidos em direção às paredes sólidas Fig. (2b), mantendo obviamente a consistência da malha. Os pontos são movidos ao longo dos lados dos elementos que os contém, até que eles se encontrem a uma distância da fronteira, especificada previamente pelo usuário. Os elementos cujos pontos movidos concorrem simultaneamente a uma mesma posição, não têm as características desejadas e são, portanto, eliminados formando-se desta maneira uma primeira camada de elementos Fig. (2b).

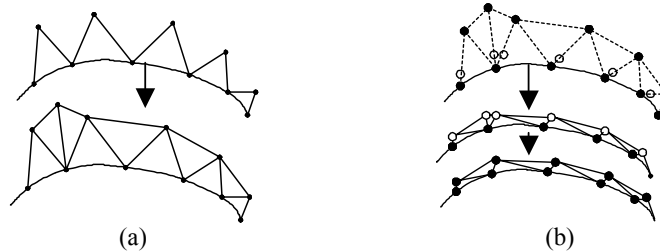


Figura 2. Avanço em Camadas: (a) Criação de uma camada; (b) Redução da espessura da camada e eliminação de elementos indesejáveis.

Ao final da formação desta camada de elementos, o processo é repetido de forma análoga para produzir um determinado número de camadas. Este número pode ser previamente especificado pelo usuário ou determinado automaticamente através de uma referência contínua à função de controle da malha, para garantir que a malha final exiba uma variação razoavelmente suave na distribuição de seus elementos.

5. Movimentação e Redefinição Global ou Local de Malhas em 2-D

Soluções numéricas de problemas de escoamento com fronteiras móveis tipicamente promovem a distorção das malhas utilizadas na análise computacional. Com o objetivo de garantirmos a consistência e a qualidade das malhas utilizadas, foram empregadas, em conjunto, estratégias de adaptação da malha, que envolvem a movimentação e a reconstrução global ou local das malhas. Primeiramente realiza-se um re-posicionamento dos nós da malha, o que não promove uma mudança topológica na mesma, e posteriormente, se necessário, realiza-se uma redefinição global ou local da malha.

5.1. Movimentação Dinâmica de Malhas

O objetivo da utilização de uma formulação “ALE” é a de minimizar o número necessário de redefinições da malha, diminuindo ainda a necessidade de interpolações entre as malhas aumentando assim a eficiência computacional e reduzindo a perda de precisão associada a estas interpolações (Sampaio et al 1993).

Inicialmente se determina a nova posição da estrutura por meio da solução das equações estruturais, ou através da utilização de uma função que define previamente o deslocamento da mesma. Os nós do domínio fluido são então deslocados de forma a minimizar as distorções nos elementos causadas pelo movimento da estrutura. É importante frisar que o algoritmo de dinâmica da malha deve satisfazer as seguintes condições de contorno:

1. Na interface fluido-estrutura os nós da interface têm deslocamentos prescritos, calculados a partir do movimento do corpo;
2. Os nós, a uma distância do corpo suficiente para que o deslocamento deste não interfira no escoamento, têm deslocamentos iguais a zero.

A idéia básica é a de obter um campo de velocidade da malha, tal que as distorções dos elementos sejam minimizadas. Com este objetivo, implementamos os seguintes algoritmos.

1. *Suavização de coordenadas* – a partir do campo de velocidades prescrito é possível obter as novas posições dos nós do contorno móvel. A malha é então suavizada com base nas posições atualizadas dos nós do contorno. Neste trabalho, com o objetivo de suavizar a malha, empregamos uma analogia com molas lineares elásticas com rigidezes associadas aos tamanhos das arestas dos elementos da malha. Os novos valores para as coordenadas são obtidos iterativamente de modo a corresponderem à configuração de equilíbrio das molas, Willcox et al (1997) e ver Farhat et al (1998);
2. *Velocidade prescrita via função analítica* – A velocidade da malha é prescrita utilizando-se uma função baseada na distância do nó ao contorno móvel, onde esta função assume valor unitário para $r = 0$ e decai para zero quando esta distância cresce. Adotamos uma variação linear com a distância. Este procedimento é extremamente eficiente se a distância pode ser obtida rapidamente em todos os tempos, porém, quando vários corpos estão presentes no

fluxo este procedimento pode tornar-se caro e impreciso, principalmente quando utilizado em modelos tridimensionais.

Existem outras alternativas, tais como a obtenção do campo de velocidades da malha modelando o mesmo através de uma equação potencial (Löhner et al 2001), porém esta possibilidade não foi analisada neste trabalho.

5.2. Redefinição Global ou Local de Malhas em 2-D

As técnicas de redefinição global (Global Remeshing) e redefinição local (Local Remeshing) da malha têm como principal virtude o fato de não aumentarem desnecessariamente o número de nós da malha, e conseqüentemente, o número de incógnitas do problema. A redefinição local de malhas é ainda mais atrativa que a redefinição global quando se têm efeitos localizados, pois, a cada etapa da adaptação, a malha é regenerada apenas nas regiões onde se faz necessária, economizando assim, memória, tempo de CPU e minimizando a região que requer interpolação entre malhas, reduzindo portanto os erros associados a esta interpolação.

Quando do uso da redefinição global de malhas, a malha discreta é reconstruída ao longo de todo o domínio, já no caso da redefinição local das malhas, após o deslocamento da malha, são identificados os elementos que ainda permanecem excessivamente distorcidos, estes elementos juntamente com seus nós são marcados e então eliminados da malha computacional. Na região marcada, a malha é reconstruída com elementos de melhor qualidade.

A implementação do método do Avanço de Frente, utilizada no nosso gerador de malhas, implica na especificação dos parâmetros desejados para a malha (espaçamentos nodais e direções de alongamento) através da malha de fundo (Background mesh) que recobre o domínio a ser discretizado. A malha de fundo utilizada é àquela que se obtém após o deslocamento da estrutura e após o processo de movimentação nodal.

Como ainda não implementamos uma análise de erros que nos permita construir a malha “ótima” a cada etapa da análise, foram utilizadas, temporariamente, algumas estratégias alternativas para a determinação destes parâmetros. A determinação da melhor estratégia a ser utilizada ainda carece de maior experimentação numérica. A seguir apresentamos brevemente as três possibilidades implementadas no gerador para a determinação dos espaçamentos nodais e direções de alongamento na malha de fundo:

Para um nó ‘*p*’ qualquer da malha, podemos definir:

- δ_{1md} – espaçamento médio na direção de alongamento;
- δ_{2md} – espaçamento médio na direção ortogonal à direção de alongamento;
- α_{1md} – direção média de alongamento;
- α_{2md} – direção ortogonal à ‘ α_{1md} ’;
- nel* – número de elementos que circundam um nó ‘*p*’;
- h* – comprimento do maior lado de um elemento circunvizinho ao nó ‘*p*’;
- c* – distância do nó ‘*p*’ ao centróide de um elemento circunvizinho.

Realizamos uma iteração nos nós da malha de fundo e,

1. Identificamos todos os elementos que circundam um dado nó ‘*p*’;
2. Para cada um destes elementos determinamos o comprimento do maior lado (δ_{1i}), a altura relativa a este lado (δ_{2i}) e a inclinação do maior lado (α_{1i});
3. Calculamos os valores médios destes parâmetros, obtendo respectivamente, δ_{1md} , δ_{2md} e α_{1md} conforme as Eqs. (7).

$$\delta_{1md} = \sum_{i=1}^{nel} \frac{\delta_{1i}}{\text{weight}}, \quad \delta_{2md} = \sum_{i=1}^{nel} \frac{\delta_{2i}}{\text{weight}}, \quad \alpha_{1md} = \sum_{i=1}^{nel} \frac{\alpha_{1i}}{\text{weight}}. \quad (7)$$

4. Calculamos então a direção ortogonal à α_{1md} , (i.e α_{2md})

O que diferencia cada estratégia é o valor dado à variável “*weight*” usada no denominador das expressões acima:

- Estratégia 1 – “*weight*” é simplesmente o número de elementos que circundam o nó ‘*p*’ (*weight* = *nel*);
- Estratégia 2 – “*weight*” é o inverso da metade do comprimento do maior lado do elemento vizinho ao nó central ‘*p*’ (*weight* = $2/h$);
- Estratégia 3 – “*weight*” é igual ao inverso da distância do nó ‘*p*’ ao centróide de cada elemento que circunda o nó ‘*p*’ (*weight* = $1/c$).

As estratégias dois e três tentam ponderar o tamanho de cada elemento na determinação dos parâmetros nodais de modo a evitar que um elemento muito grande ou muito alongado predomine sobre os outros elementos. O primeiro caso consiste numa simples média aritmética dos valores dos parâmetros dos elementos que circundam um dado nó.

Os elementos da malha serão considerados excessivamente distorcidos se:

1. Área atual do elemento variou mais que A% da área original;
2. Um dos ângulos internos (θ) do elemento não se encontrar na faixa $\theta_{ref} \leq \theta \leq 180^\circ - \theta_{ref}$.

Uma vez determinados todos os elementos conforme descrito anteriormente, efetua-se uma redefinição da malha se:

1. Um elemento possuir pelo menos um de seus ângulos internos tal que $\theta \leq \theta_{min}$ ou $\theta > \theta_{max}$;
2. A percentagem de elementos distorcidos for maior ou igual a B%.

Nos casos estudados neste trabalho adotou-se $A = 20\%$, $\theta_{ref} = 30^\circ$, $\theta_{min} = 2^\circ$, $\theta_{max} = 170^\circ$ e $B = 2\%$.

Os critérios acima visam evitar elementos com distorção excessiva que tornem a análise numérica instável, além de melhorar a qualidade dos elementos antes da deterioração completa dos mesmos, evitando redefinições sucessivas de malhas devido a um único ou poucos elementos a cada iteração.

6. Aplicações

Neste trabalho foram testadas as múltiplas características do gerador de malhas no estudo de problemas de interação fluido-estrutura. Dentre estas características destacam-se a capacidade de geração de múltiplos domínios, malhas anisotrópicas na camada limite, realização de redefinição global ou local de malhas, entre outras.

A seguir apresentamos uma seqüência de malhas para um problema puramente acadêmico da adaptação de uma malha gerada em torno de um cilindro que se desloca com três graus de liberdade, sendo dois translacionais e um rotacional. Nas Figuras (3a) e (3b) apresentamos a malha triangular inicial e a malha deformada obtida após o deslocamento do cilindro. As Figuras (4a) e (4b) mostram os buracos formados numa etapa intermediária da redefinição local de malhas. Nas Figuras (5a) e (5b), são mostradas, respectivamente, os detalhes da malha deformada, Fig. (3b), e da malha obtida após a redefinição da malha, Fig (4b). Fica clara pela observação das figuras a melhoria da qualidade dos elementos obtidos pelo processo de redefinição local de malhas. Nas Figuras (5a) e (5b) podem ainda ser observados, os elementos no interior da região da camada limite os quais são mantidos indeformáveis para se evitar a perda de precisão da solução nesta região.

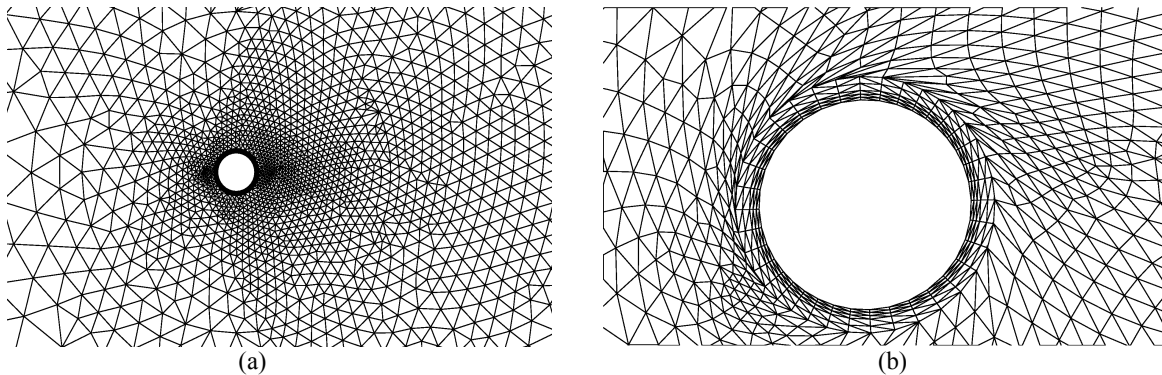


Figura 3. Malha triangular em torno de um cilindro: (a) Malha inicial; (b) Malha deformada.

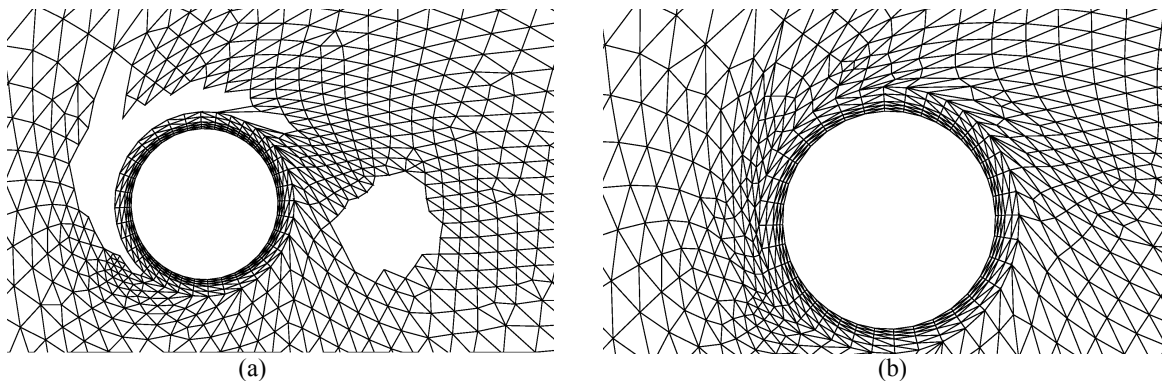


Figura 4. Redefinição local da malha da Fig. (3b): (a) Etapa intermediária; (b) Malha final triangular.

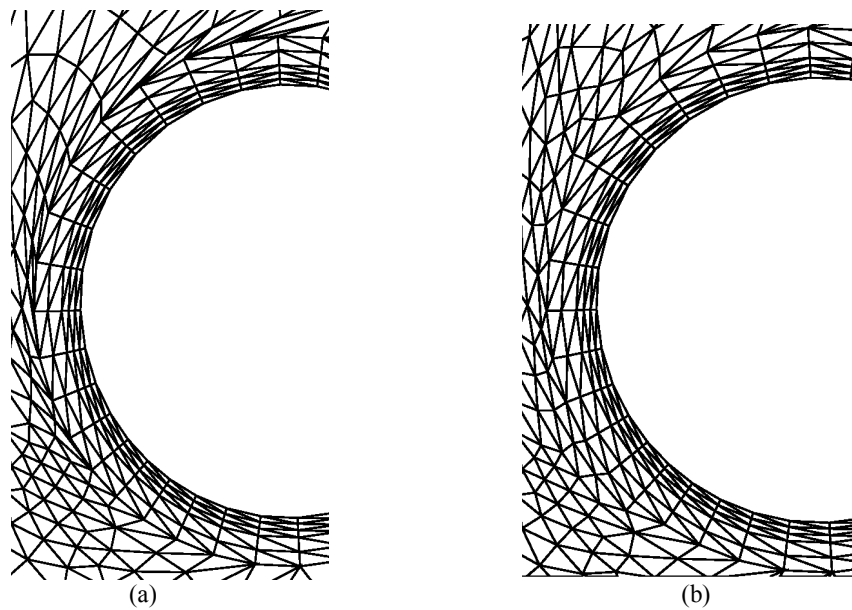


Figura 5. Detalhe mostrando malha deformada (a) e malha obtida após a redefinição local (b).

O sistema acoplado, englobando os programas de dinâmica dos fluidos, dinâmica estrutural e o gerador de malhas, foi testado na obtenção da solução de um problema de interação fluido-estrutura, onde um cilindro rígido encontra-se imerso em um fluido viscoso incompressível.

A Fig. (6) mostra uma comparação realizada considerando-se os casos onde os nós da malha computacional que pertencem à região da camada limite têm: deslocamentos livres obtidos na análise de molas lineares ou têm deslocamentos prescritos idênticos ao do corpo, evitando assim a deformação dos elementos nesta região.

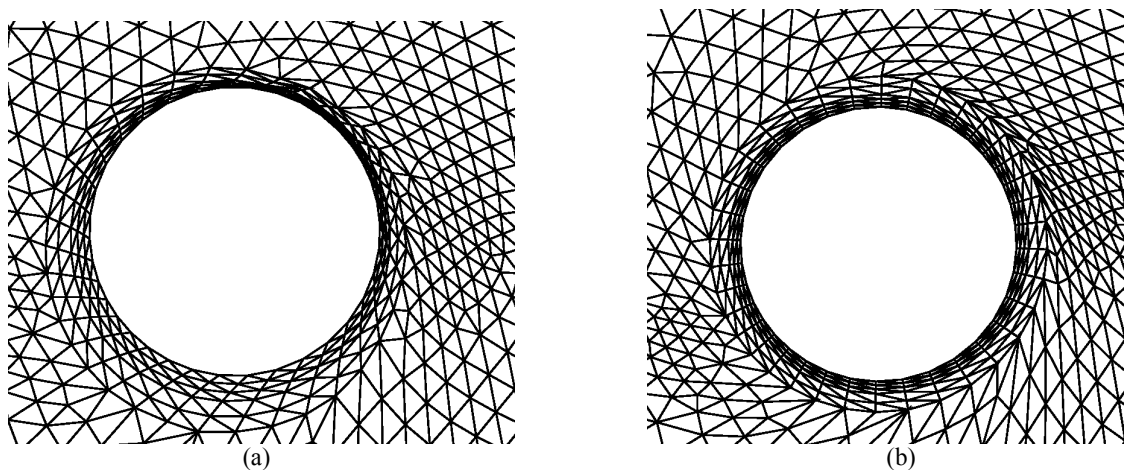


Figura 6. Malha final deformada antes da redefinição local: com deformação da camada limite (a) e sem deformação da camada limite (b).

A Tabela 1. mostra uma comparação dos resultados obtidos para as malhas das Fig. (6a) e (6b) acima, considerando-se a iteração em que ocorre a necessidade da primeira redefinição da malha, e o numero de nós arrancados. No caso onde o deslocamento da camada limite é prescrito igual ao deslocamento do corpo rígido, Fig. (6b), a primeira redefinição de malha acontece quando o deslocamento do cilindro alcança uma razão de amplitude de aproximadamente 0.7 do diâmetro do cilindro, na 515ª iteração, enquanto que para o caso onde a camada limite esta livre para deslocar-se, Fig. (6a), a razão de amplitude para a qual ocorreu a primeira redefinição de malha foi de 0.5 aproximadamente, na 420ª iteração, portanto a utilização da estratégia que mantém os elementos do interior da camada limite indeformáveis, leva a uma redução do número de redefinições de malhas necessárias e conseqüentemente a uma maior eficiência computacional. Além disso, como era esperado, no caso de se permitir a deformação da malha no interior da camada limite, Fig. (6a), a deterioração da qualidade dos elementos se dá no interior da camada limite, que é uma região de extrema importância para à solução adequada do problema e onde redefinições e interpolações devem ser evitadas.

Tabela 1. Comparação no número de iterações e número de nós arrancados para as diferentes estratégias de deslocamento da camada limite.

Tipo de deslocamento da camada limite	Iteração	Nº de nós arrancados
Deslocamento prescrito	515	12
Deslocamento livre	420	94

Todas as características descritas anteriormente referentes à capacidade do nosso sistema computacional foram aplicadas à análise da interação entre um fluido e um cilindro circular. A Figura (7) abaixo, mostra a variação da vorticidade em torno de um cilindro para o caso onde o cilindro apresenta movimento prescrito. Este exemplo foi obtido com $Re = 160$ e uma razão de amplitude de deslocamento de 0.05 do diâmetro do cilindro. Para este caso observou-se o fenômeno de “lock-in” (Blevins, 1986) imposto pelo movimento do cilindro. Para maiores detalhes com relação à descrição do problema e um estudo do fenômeno de “lock-in” com movimento prescrito ao cilindro, ver a referência Antunes & Lyra, 2002.

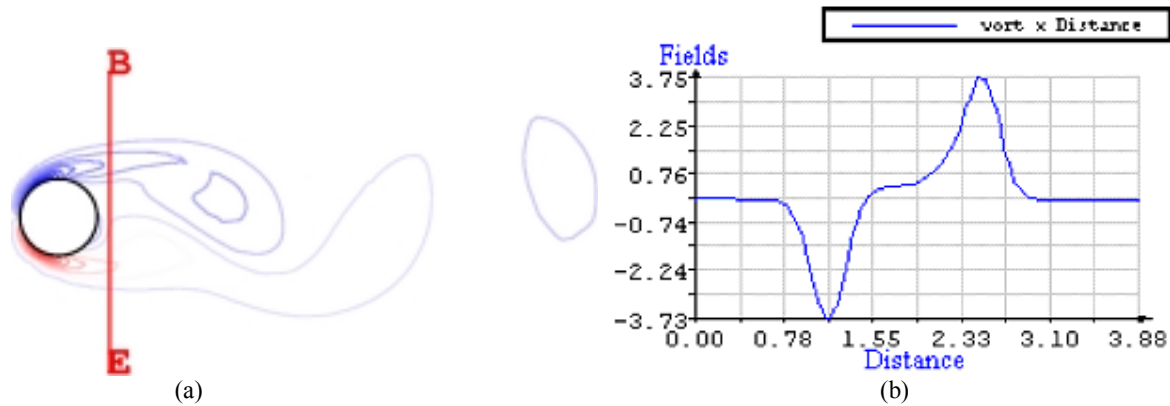


Figure 7. Isocurvas de vorticidade (a) e variação da vorticidade (adimensional) ao longo de BE (adimensional) (b).

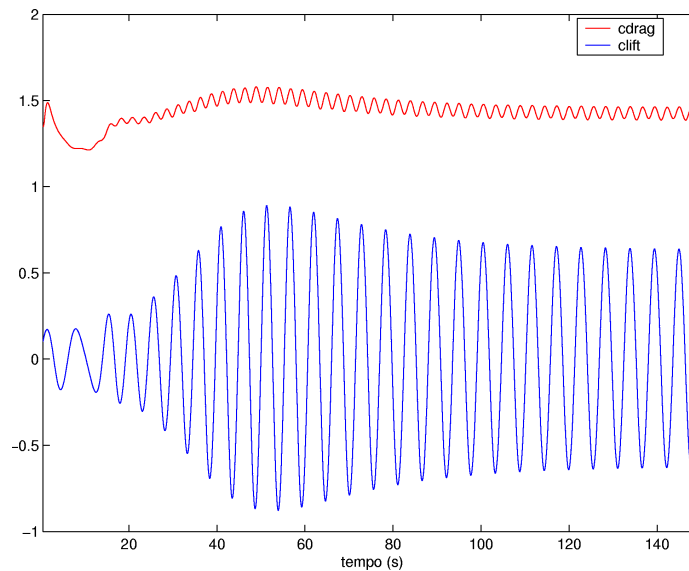


Figura 8. Coeficientes de arrasto e sustentação.

A Figura (8) mostra a evolução no tempo dos coeficientes de arrasto e sustentação do cilindro no caso mencionado anteriormente. O movimento imposto ao cilindro interfere na frequência da formação da esteira de vórtices até que esta frequência fica idêntica à imposta ao cilindro (“lock-in”). O intervalo de interferência é visto nos gráficos da Fig. (8), até tempo aproximadamente igual a 100 segundos, e a partir daí o fenômeno do “lock-in” se estabelece e os coeficientes estabilizam com valores periódicos.

7. Conclusões

Ficou demonstrada a importância do uso de múltiplos domínios para reduzir a necessidade de geração de malhas e de atualização do cálculo das matrizes dos elementos e vetores de cálculo. Foram também realçadas, a necessidade e a importância da técnica de redefinição de malhas local, no estudo de problemas que envolvem grandes deslocamentos e onde o uso isolado das estratégias de movimentação da malha não é suficiente para impedir a deterioração dos elementos da malha, com conseqüente instabilidade das análises. Destacamos ainda a importância do conjunto de estratégias apresentadas, tanto do ponto de vista da eficiência computacional como da precisão dos resultados obtidos, já que são necessárias menos interpolações de dados entre malhas, reduzindo o acúmulo de erros numéricos gerados por estas interpolações. É importante salientar que no futuro pretendemos incorporar a adaptação de malhas controlada por uma análise de erros a-posteriori. Finalmente, os resultados encontrados atestam a potencialidade do nosso sistema computacional para a análise de problemas de interação fluido-estrutura envolvendo pequenos e grandes deslocamentos da estrutura.

8. Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer à CAPES, ao CNPq e ao MCT-ANP pelo suporte financeiro fornecido durante a realização deste trabalho.

9. Referências

- Antunes, A. R. E., Lyra, P. R. M., 2002, "Formulação Petrov-Galerkin do Método dos Elementos Finitos na Solução de Problemas de escoamentos Viscosos Incompressíveis com Fronteira Móvel", Congresso Nacional de Engenharia Mecânica (CONEM), João Pessoa, PB, In CD-ROM.
- Azevedo, R. L., Antunes, A. R. E. & Lyra, P. R. M., 2002, "Comparação de Estratégias de Movimentação de malha numa Formulação 'ALE' Aplicadas a Problemas de Interação Fluido-Estrutura", 9º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências Térmicas, ENCIT, Caxambu, MG, In CD-ROM.
- Blevins, R. D., 1986, "Flow-Induced Vibration", Robert E. Krieger Publishing Company, Inc, Malabar, Florida, 363 p.
- Blom, J. F. & Leyland, P., 1998, "Consistency Analysis of Fluid-Structure Interaction Algorithms", European Congress on Computational methods in Applied Sciences and Engineering (ECCOMAS), Barcelona, In CD-ROM.
- Brooks, A. N. & Hughes, T. J. R., 1982, "Streamline Upwind/Petrov-Galerkin Formulations for Convection Dominated Flows with Particular Emphasis on the Incompressible Navier-Stokes Equations", Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol 32, pp. 199-259.
- Carvalho, D. K. E., 2001, "Um sistema computacional para geração e adaptação de malhas não-estruturadas bidimensionais", Depto. de Eng. Mecânica UFPE, Dissertação de Mestrado.
- Correia, A. C. A., 2001, "Simulações Computacionais da Formação de Vórtices em um Cilindro com Ênfase na Vibração Induzida por Vórtice", Depto. de Eng. Mecânica UFPE, Dissertação de Mestrado.
- Farhat, C., Degand, C., Koobus and B., Lesoinne, M., 1998, "Torsional Springs for Two-Dimensional Dynamic Unstructured Fluid Meshes", Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, vol 163, pp. 231-245.
- Hassan, O.; Morgan, K.; Probert, E. J.; Peraire, J., 1996, "Unstructured tetrahedral mesh generation for three-dimensional viscous flows", International Journal for Numerical Methods in Engineering, vol. 39, pp. 549-567.
- Hassan, O., Morgan, K., Probert, E. J., Peraire, J.; Tharejá, R. R., 1991, "Adaptive unstructured mesh methods for steady viscous flows", Technical Report, 91-1538, AIAA.
- Hughes, T.J.R. & Nomura, T., 1992, "An Arbitrary Lagrangean-Eulerian Finite Element Method for Interaction of Fluid and a Rigid Body", Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol 95, pp. 115-138.
- Löhner, Raunald, 2001, "Applied CFD Techniques, An Introduction based on Finite Element Methods", John Wiley & Sons Ltd., West Sussex, England, 266 p.
- Lyra, P. R. M. & Carvalho, D. K. E., 2000, "A flexible unstructured mesh generator for transient anisotropic remeshing", European Congress on Computational methods in Applied Sciences and Engineering (ECCOMAS), Barcelona, In CD-ROM.
- Mendes, P.A. & Branco, F.A., 1999, "Analysis of Fluid-Structure Interaction by an Arbitrary Lagrangean-Eulerian Finite Element Formulation", Int. J. for Numer. Meth. In Fluids, Vol. 30, pp. 897-919.
- Peraire, J.; Peiró, J.; Morgan, K., 1999, "Advancing front grid generation", In: Handbook of Grid Generation. Florida, CRC Press, pp. 17.1-17.22.
- Sampaio, P.A.B., 1991, "A Petrov-Galerkin Formulation for the Incompressible Navier-Stokes Equations using Equal Order for Velocity and Pressure", Int. J. Numer. Meth. Eng., Vol. 31, pp. 1135-1149.
- Sampaio, P. A. B.; Lyra, P. R. M., Morgan, K., Weatherill, N., 1993, "Petrov-Galerkin Solutions of Incompressible Navier-Stokes Equations in Primitive Variables with Adaptive Remeshing", Computer Methods and Applied Mechanics and Engineering, Vol 106, pp. 143-178.
- Sampaio, P. A. B. & Coutinho, A. L. G. A., 1999, "Simulation of Free and Forced Convection Incompressible Flows an Adaptive Parallel/Vector Finite Element Procedure", Int. J. Num. Meth. Engr., Vol 29, pp. 289-309.

Willcox, K. & Peraire, J., 1997, "Aeroleastic Computations in the Time Domain Using Unstructured Meshes", Int. J. for Numer. Meth In Fluids, Vol. 40, pp 2413-2431.

DIFFERENT STRATEGIES OF UNSTRUCTURED MESH MOVEMENT AND REMESHING IN THE TREATMENT OF FLUID-STRUCTURE INTERACTION PROBLEMS

Alessandro R. Echevarria Antunes

Departamento de Engenharia Mecânica - UFPE
Av. Acadêmico Hélio Ramos, S/N, Recife/PE,
CEP 50740-530 – Brasil
aantunes@demec.ufpe.br

Darlan K. Elisiário de Carvalho

Departamento de Engenharia Mecânica - UFPE
Av. Acadêmico Hélio Ramos, S/N, Recife/PE,
CEP 50740-530 – Brasil
darlan@demec.ufpe.br

Paulo R. Maciel Lyra

Departamento de Engenharia Mecânica - UFPE
Av. Acadêmico Hélio Ramos, S/N, Recife/PE,
CEP 50740-530 – Brasil
prmlyra@demec.ufpe.br

Abstract. *In the present work we treat problems involving fluid-structural coupling and especially the study of vortex induced vibrations (VIV), where a rigid body interacts with the flow that is modeled as incompressible. A Petrov-Galerkin formulation of the finite element method is used to perform the spatial discretization of the incompressible Navier-Stokes equations that are described through a mixed "ALE" (Arbitrarian Lagrangean Eulerian) formulation. The structure being studied consists in a circular rigid cylinder supported by elastic springs. It is also exploited the fact that the unstructured mesh generator utilized allows for the previous definition of multiple subdomains, where the meshes can be generated in a consistent and independent way. Besides it is also capable of generating meshes with stretched elements within the boundary layers regions. The existence of multiple subdomains allows for the use of different strategies to deal with each of them, where the different formulations (ALE with or without mesh deformation and Eulerian) are used, which has serious implications in the accuracy and computational efficiency. Over the subdomains with ALE formulation, with the dynamic deformable mesh, when the quality of the mesh elements is too bad, we exploit the flexibility of mesh generator utilized, which allows for the global or local remeshing of the domain through the different subdomains. The procedures presented are utilized in the solution of model problems involving the movement of circular cylinder immersed in a liquid flow with the objective of demonstrating the diverse features of the strategies and procedures developed.*

Keywords. *Fluid-Structure Interaction, ALE, Dynamic Mesh, Global and Local Remeshing,*