

Uma formulação baseada em posições para análise 2D de interação fluido estrutura com contato estrutural

Darcy H. F. R. Moreira¹, Rodolfo A. K. Sanches¹

¹*Departamento de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo
Av. Trabalhador São-carlense, 400, São Carlos, São Paulo, Brasil
darcyhannah@usp.br, rodolfo.sanches@usp.br*

Resumo. Entre os problemas de escoamentos de fluido com contornos móveis, os casos em que há mudanças topológicas no domínio do fluido são bastante desafiadores. Essas mudanças podem acontecer devido a efeitos de superfície livre, como problemas de quebras de ondas, ou devido ao contato estrutural em alguns problemas de interação fluido-estrutura. Na literatura, com relação ao método dos elementos finitos aplicado a esses problemas, vários trabalhos têm sido realizados empregando métodos de captura de interface. Tais métodos consideram a interface móvel como um contorno imerso que se move dentro de uma malha de fluido fixa. Mais recentemente, surge um paradigma combinando elementos finitos e métodos de partículas (PFEM), onde fluido e estrutura são descritos na formulação Lagrangiana. Neste trabalho, tendo como base o PFEM, emprega-se uma formulação baseada em posições nodais para o meio sólido e posições de partículas para o meio fluido. Assim, gera-se uma malha de elementos finitos tendo como vértices as partículas, resolvendo-se as equações do movimento em descrição Lagrangiana. As altas distorções da malha do fluido são superadas pela combinação do remalhamento com o conceito de partícula a cada passo de tempo, atualizando a configuração de referência (descrição Lagrangiana atualizada). O contato estrutural é considerado por uma abordagem de nó-a-segmento, e a integração no tempo para ambos, sólido e fluido, é realizada pelo método alpha-generalizado. O acoplamento fluido-estrutura é facilmente implementado de forma monolítica, uma vez que os parâmetros nodais do fluido e da estrutura são as posições atuais. Neste artigo, consideram-se problemas em estado plano de deformação, sendo utilizados elementos finitos triangulares isoparamétricos de aproximação cúbica para modelar a estrutura e elementos finitos triangulares de aproximação linear para o fluido. Conforme demonstrado pelo exemplo numérico apresentado, a formulação proposta se mostra qualitativamente robusta e com potencial de ser aplicada a diversos problemas, incluindo problemas de interação sangue-válvulas vasculares.

Palavras-Chave: Método dos elementos finitos posicional, Método de elementos finitos e partículas, Contato estrutural.

1 Introdução

A simulação de escoamentos com contornos móveis em que há mudança topológica do domínio do fluido é bastante desafiadora. Dentre tais problemas estão alguns escoamentos de superfícies livres (Akkerman et al. [1]) e problemas de interação fluido-estrutura (IFE) com contato estrutural (Ager et al. [2]). A principal dificuldade consiste na discretização que possa acomodar a movimentação e modificações dos contornos e interfaces, e, quando há presença de contato entre as estruturas móveis, como visto em Takizawa et al. [3], têm-se ainda a imposição de condição de não penetração entre as interfaces em contato, que podem interferir na precisão da solução e gerar oscilações espúrias.

As técnicas utilizadas para o tratamento de escoamentos com contornos móveis podem ser classificadas em dois diferentes grupos, de acordo com Tezduyar [4]: métodos de rastreamento de interface (*interface tracking*), ou métodos de malhas adaptadas e métodos de captura de interface (*interface capturing*), ou métodos de malhas não adaptadas.

No primeiro grupo, a malha do fluido precisa ser dinamicamente deformada para seguir os movimentos da estrutura, garantindo conformidade do contorno do fluido com a configuração atual da estrutura. Para utilização desses métodos, utiliza-se uma descrição Lagrangiana-Euleriana arbitrária (ALE) para o fluido (Sanches and Coda [5]) ou formulações estabilizadas espaço-tempo (*Stabilized Space-Time* - DSD/SST) (Bazilevs et al. [6]).

Para os problemas com mudanças topológicas no domínio do fluido, os métodos *interface tracking* se tornam inadequados, pois se limitam a deslocamentos suaves o suficiente para que a malha do fluido possa ser deformada sem distorção excessiva ou inversão de elementos, salvo o uso de técnicas especiais e de alto custo computacional. Para esses casos, os métodos *interface capturing* são amplamente empregados, como pode ser visto em Akkerman et al. [1]. Esses métodos tratam a interface móvel como um limite imerso que se move dentro de uma malha de fluido fixa, considerando as condições da interface como restrições introduzidas nas equações governantes por técnicas de contorno imerso. De acordo com Fernandes et al. [7], sua principal desvantagem está na dificuldade de se realizar um refino adaptativo da malha de modo a capturar os efeitos de camada limite na vizinhança da estrutura, além das dificuldades quanto às imposições das condições de contorno imersas, e de demandarem a solução de uma equação extra que identifique a fronteira imersa.

Em descrição Lagrangiana, os métodos de partículas, introduzidos por Gingold and Monaghan [8], surgem como alternativa para simular escoamentos com contornos móveis e casos com mudanças topológicas do fluido. Através desses métodos, considera-se o domínio do fluido como uma nuvem de partículas em que as forças de interação são definidas de acordo com um modelo numérico, com as equações de movimento em descrição Lagrangiana. O uso dessa descrição torna o acoplamento com o sólido (que também é resolvido em descrição Lagrangiana) muito simples, além de eliminar os termos convectivos que causam instabilidade na solução por elementos finitos, permitindo o uso em problemas de FSI com condições de contorno complexas e com constantes alterações em seu domínio, como visto em Monaghan [9].

Baseado nesses métodos, Idelsohn et al. [10] propôs o Método dos Elementos Finitos e Partículas (PFEM), que consiste na discretização do domínio através de um conjunto de partículas que transportam as propriedades físicas do fluido e na geração de uma malha de elementos finitos a cada passo no tempo de forma a resolver a equação de movimento, sendo bastante vantajoso e eficiente para resolver problemas com mudanças topológicas no domínio, conforme visto em Franci et al. [11].

Com relação à mecânica dos sólidos, Coda [12] introduz o método dos elementos finitos posicional, onde emprega de graus de liberdade em posições, ao invés dos tradicionais deslocamentos. Tal formulação tem sido aplicada com sucesso para problemas de interação fluido-estrutura (Sanches and Coda [5]), além de ser utilizada também para fluidos em uma abordagem Lagrangiana total, introduzida por Avancini and Sanches [13]. Segundo Avancini and Sanches [13], quando comparado ao método dos elementos finitos (MEF) tradicional, a formulação posicional apresenta equacionamento mais compacto, ficando sua escrita mais simples e direta, além de se mostrar natural e verdadeiramente isoparamétrica, já que seus parâmetros nodais (incógnitas do problema) são também os parâmetros que aproximam a geometria do sólido.

Já o contato entre os sólidos deformáveis pode ser modelado numericamente em duas etapas: a detecção da intersecção e a imposição das condições de não-penetração, sendo o procedimento da solução afetado diretamente pela técnica da discretização. Uma das técnicas utilizadas é a nó-a-nó (NTN), abordada por Mashayekhi et al. [14], possuindo uma base apenas nodal. Essa técnica é inviável para os problemas analisados neste artigo, pois não há garantia de coincidência das malhas. Já por meio do esquema nó-a-segmento para 2 dimensões ou nó-a-superfície para 3 dimensões (NTS), introduzidos por Hughes et al. [15], é possível distinguir as interfaces de contato por meio de nós projéteis (definidos pelos nós do corpo projétil) e segmentos ou superfícies alvos (definidos pelos elementos na superfície do corpo alvo). Por outro lado, o método segmento-a-segmento para 2 dimensões ou superfície a superfície para 3 dimensões (STS), encontrado em Puso and Laursen [16], propõe uma abordagem com alta precisão nas restrições de contato, apesar da incorrespondência das malhas nas interfaces.

Neste trabalho, emprega-se o método dos elementos finitos posicional tanto para o fluido, quanto pra estrutura. As altas distorções que aparecem na discretização dos fluidos são superadas pela combinação do remalhamento com o conceito de partículas (PFEM), atualizando a configuração de referência a cada passo de tempo (descrição Lagrangiana atualizada). O contato entre as estruturas é modelado através da técnica nó-a-segmento (NTS) e o acoplamento é do tipo monolítico, mostrando-se robusto através da simulação do exemplo numérico.

Este artigo está organizado da seguinte forma: na seção 2 apresentam-se alguns conceitos relevantes à descrição cinemática do contínuo; na seção 3, os princípios do MEF posicional; na seção 4 são apresentados os principais conceitos da mecânica dos fluidos, bem como a formulação PFEM posicional; na seção 5 apresenta-se a formulação do FEM posicional para sólidos e a estratégia utilizada para modelar o contato entre estruturas; na seção 6 é apresentado o acoplamento monolítico utilizado, o tipo de integrador temporal e a metodologia de solução; na seção 7 é apresentado um exemplo de aplicação do método desenvolvido e por fim, na seção 8 são apresentadas as conclusões.

2 Descrição cinemática de meios contínuos deformáveis

Assume-se uma função de deformação, denominada função mudança de configuração, $f(\mathbf{x})$, que mapeia cada partícula da configuração inicial do corpo contínuo (Ω_0 , com coordenadas \mathbf{x}), à sua posição atual (Ω , com

coordenadas \mathbf{y}). Assim, definindo-se o gradiente da função mudança de configuração com relação às posições iniciais como $\nabla_{\mathbf{x}}\mathbf{f} = \mathbf{A}$, pode-se escrever a deformação de Green-Lagrange como:

$$\mathbf{E} = \frac{1}{2} \cdot (\mathbf{C} - \mathbf{I}), \quad (1)$$

onde \mathbf{I} é o tensor identidade e \mathbf{C} é o chamado tensor alongamento à direita de Cauchy-Green, dado por ($\mathbf{C} = \mathbf{A}^t \cdot \mathbf{A}$).

3 Leis constitutivas

Sabendo-se que o tensor de Piola-Kirchhoff de segunda espécie \mathbf{S} é o conjugado energético da deformação de Green, define-se a variação da energia específica de deformação por unidade de volume como:

$$\delta u_e = \frac{\partial u_e}{\partial \mathbf{E}} : \delta \mathbf{E} = \mathbf{S} : \delta \mathbf{E}. \quad (2)$$

A lei constitutiva para fluidos Newtonianos incompressíveis em descrição Lagrangiana total é dada por (ver Avancini and Sanches [13]):

$$\mathbf{S} = \mathcal{D}_0 : \dot{\mathbf{E}} - pJ\mathbf{C}^{-1}. \quad (3)$$

onde p é a pressão hidrostática, \mathcal{D}_0 é o tensor constitutivo de quarta ordem, dado em função da configuração atual, J é o Jacobiano do gradiente da função mudança de configuração ($J = \text{Det}(\mathbf{A})$) e $\dot{\mathbf{E}} = \mathbf{A}^T \dot{\mathbf{e}} \mathbf{A}$, sendo $\dot{\mathbf{e}}$ a taxa de deformação infinitesimal e $(\dot{\cdot})$ indica derivada material no tempo.

Para os sólidos, sabendo que \mathfrak{C} é o tensor constitutivo elástico de quarta ordem considerando a lei constitutiva de Saint-Venant-Kirchhoff, escreve-se:

$$\mathbf{S} = \mathfrak{C} : \mathbf{E} \quad (4)$$

4 O Princípio da estacionariedade da energia

O funcional de energia mecânica total (Π) é composto pela soma das parcelas de energia potencial das forças externas (\mathbb{P}), de deformação (\mathbb{U}) e cinética (\mathbb{K}). O estado de equilíbrio mecânico procurado ocorre quando a variação do potencial desse funcional é nulo, que traduz o princípio da estacionariedade, base da solução pelo método dos elementos finitos posicional, ou seja:

$$\delta \Pi = \delta \mathbb{P} + \delta \mathbb{U} + \delta \mathbb{K} = - \int_{\Gamma_0} \mathbf{q} \cdot \delta \mathbf{y} d\Gamma_0 - \int_{\Omega_0} \mathbf{b} \cdot \delta \mathbf{y} d\Omega_0 + \int_{\Omega_0} \mathbf{S} : \delta \mathbf{E} d\Omega_0 + \frac{1}{2} \int_{\Omega} \rho_0 \delta(\dot{\mathbf{y}} \cdot \dot{\mathbf{y}}) d\Omega = 0, \quad (5)$$

onde \mathbf{q} são as forças distribuídas ao longo da superfície inicial Γ_0 e \mathbf{b} são as forças distribuídas em parte do volume inicial Ω_0 , ambas consideradas conservativas.

5 Mecânica dos fluidos computacional

5.1 Solução para os escoamentos incompressíveis

Para o fluido incompressível, a variação da energia mecânica total (funcional de energia) (eq. (5)) é nula tanto com relação às posições atuais das partículas quanto com relação às pressões (parcela hidrostática de tensão). A última condição decorre da incompressibilidade do escoamento, onde a pressão atua como multiplicador de Lagrange impondo deformação volumétrica nula. Como apenas a parcela referente à energia de deformação depende da pressão, substituindo a eq. (3) na eq. (5), ao aplicar o princípio da estacionariedade, temos:

$$\frac{\partial \Pi}{\partial \mathbf{y}} = \frac{\partial}{\partial \mathbf{y}} \left(- \int_{\Gamma_0} \mathbf{q} \cdot \mathbf{y} d\Gamma_0 - \int_{\Omega_0} \mathbf{b} \cdot \mathbf{y} d\Omega_0 + \int_{\Omega_0} \dot{\mathbf{E}} : \mathcal{D}_0 : \mathbf{E} d\Omega_0 + \frac{1}{2} \int_{\Omega_0} \rho_0 (\dot{\mathbf{y}} \cdot \dot{\mathbf{y}}) d\Omega_0 \right) = 0, \quad (6)$$

$$\frac{\partial \Pi}{\partial p} = \frac{\partial}{\partial p} \left(\int_{\Omega_0} p J \mathbf{C}^{-1} : \mathbf{E} d\Omega_0 \right) = 0, \quad (7)$$

onde ρ_0 é a massa específica do fluido.

Para que se realize a discretização do fluido em elementos finitos posicional, aproximam-se as posições e as pressões através de interpolações das funções de forma ϕ para cada nó (partícula) i ($\mathbf{x}^h(\boldsymbol{\xi}) = \phi_i(\boldsymbol{\xi})\mathbf{x}_i$ e $\mathbf{y}^h(\boldsymbol{\xi}) = \phi_i(\boldsymbol{\xi})\mathbf{y}_i$ e $p^h(\boldsymbol{\xi}) = \phi_i(\boldsymbol{\xi})p_i$), onde o sobrescrito $(\cdot)^h$ indica uma variável interpolada pela discretização em elementos finitos. Dessa forma, \mathbf{x}_i , \mathbf{y}_i e p_i são as coordenadas iniciais, atuais e pressão, respectivamente, do nó i e $\boldsymbol{\xi}$ é o vetor coordenada do espaço adimensional a partir do qual mapeiam-se os elementos. Para o fluido, serão utilizados elementos triangulares com funções aproximadoras de ordem 1 (linear), tanto para a pressão quanto para a posição.

Reescreve-se então a eq. (6) e a eq. (7) utilizando as aproximações do FEM posicional:

$$\frac{\partial \Pi}{\partial \mathbf{y}_i} = \int_{\Omega_0} \rho_0 \phi_i \ddot{\mathbf{y}}^h d\Omega_0 + \int_{\Omega_0} \dot{\mathbf{E}}^h : \mathcal{D}_0^h : \frac{\partial \mathbf{E}^h}{\partial \mathbf{y}_i} d\Omega_0 - \int_{\Omega_0} \phi_i p_i J \mathbf{C}^{-1} \frac{\partial (\mathbf{E}^h)}{\partial \mathbf{y}_i} d\Omega_0 - \int_{\Omega_0} \phi_i \mathbf{b} d\Omega_0 - \int_{\Gamma_0} \phi_i \mathbf{q} d\Gamma_0 = 0, \quad (8)$$

$$\frac{\partial \Pi}{\partial p_i} = \int_{\Omega_0} \phi_i J^h \mathbf{C}^{-1} : \mathbf{E}^h d\Omega_0 = 0. \quad (9)$$

5.2 Estabilização da pressão

Quando se usam funções de mesma ordem para aproximar as pressões e as posições, o sistema algébrico se torna mal condicionado e instável, e se diz que nesse caso existem modos espúrios de pressão. Dessa forma, para que se possa estabilizar a formulação, serão inseridos termos estabilizantes na pressão através do método PSPG (*Pressure stabilized Petrov-Galerkin*) (Tezduyar [17]). Adaptando o método inicialmente desenvolvido para formulações Eulerianas, na formulação Lagrangiana adicionando-se à eq. (9) a expressão R_s , que estabiliza a solução, temos:

$$\frac{\partial \Pi}{\partial p_i} + (R_s)_i = \int_{\Omega_0} \phi_i J^h \mathbf{C}^{-1} : \mathbf{E}^h d\Omega_0 + \int_{\Omega_0} \tau_{\text{PSPG}} \frac{1}{\rho_0} \left(\mathbf{A}^{h-t} \nabla_{\mathbf{x}} \phi_i \right) \cdot \left(\rho_0 \ddot{\mathbf{y}} - \nabla_{\mathbf{x}} \cdot \left(\mathbf{S}^h \mathbf{A}^{h-t} \right) - \mathbf{b}_0 \right) d\Omega_0 = 0. \quad (10)$$

onde τ_{PSPG} é calculado semelhantemente à Bazilevs et al. [6], mas ignorando os termos convectivos (para mais detalhes, ver Bazilevs et al. [6]).

5.3 O método dos elementos finitos e partículas em formulação posicional

Ao utilizar o PFEM, as equações governantes são resolvidas através das aproximações do FEM em formulação posicional, utilizando a descrição Lagrangiana, eliminando seus termos convectivos e facilitando o acoplamento com o sólido.

No entanto, com este método há a dificuldade em gerar eficientemente a malha à cada passo e determinar a superfície de contorno (Idelsohn et al. [10]). Para isso, recorre-se à técnica de triangulação de Delaunay à cada passo de tempo, utilizando o algoritmo de código livre *triangle* proposto por Shewchuk [18] junto com a definição do contorno e eliminação de elementos distorcidos através do método *alpha-shape* (para mais detalhes do método, consultar Edelsbrunner and Mücke [19]).

6 Dinâmica das estruturas

Para a discretização do sólido, tomam-se como parâmetros nodais apenas as posições, e, neste trabalho opta-se por utilizar funções de forma com ordem cúbica (10 nós por elemento). Como o funcional de energia mecânica total

só depende das posições atuais para o sólido, sendo o tensor de Piola-Kirchhoff (\mathbf{S}) calculado através da eq. (4), utilizando a eq. (5) com as aproximações por elementos finitos, escreve-se o seguinte sistema a ser resolvido:

$$\frac{\partial \Pi}{\partial \mathbf{y}_i} = \int_{\Omega_0} \rho_0 \phi_i \ddot{\mathbf{y}}^h d\Omega_0 + \int_{\Omega_0} \mathbf{S}^h \frac{\partial \mathbf{E}^h}{\mathbf{y}_i} d\Omega_0 d\Omega_0 - \int_{\Omega_0} \phi_i \mathbf{b} d\Omega_0 - \int_{\Gamma_0} \phi_i \mathbf{q} d\Gamma_0 = 0, \quad (11)$$

6.1 Modelo de contato

Para discretizar o contato entre os sólidos adotou-se a estratégia nó-a-segmento, em que as interfaces em contato são discretizadas por nós, denominados nós-projéteis (\mathbf{y}^N), e em elementos de linha curva, denominados segmentos-alvo (\mathbf{y}^S), através do parâmetro adimensional ξ .

O primeiro passo consiste na identificação do contato, determinando o ponto exato do contorno alvo em que houve a penetração do nó projétil. Com a identificação de contato, é necessário ativar a restrição de contato para os nós-projéteis e segmentos-alvo envolvidos. Nota-se a ocorrência de contato quando a projeção normal do nó projétil sobre o segmento alvo seja menor ou igual a zero ($g_n = (\mathbf{y}^N - \mathbf{y}^S(\xi)) \cdot \mathbf{n}(\xi) \leq 0$), o que significa dizer que o nó projétil penetrou na estrutura-alvo.

Para impor a condição de impenetrabilidade entre as duas estruturas em contato, sem considerar atrito, é necessário adicionar ao sistema a restrição $g_n = 0$. Essa condição é imposta através de multiplicadores de Lagrange. Por meio dessa técnica, adicionam-se novas variáveis (λ) aos nós projéteis, as quais correspondem às forças de contato que atuam nos respectivos nós. Neste trabalho, optou-se por não admitir atrito entre as estruturas em contato, o que restringe λ apenas a valores menores ou iguais a zero (que correspondem às forças de compressão). Valores positivos requerem, portanto, a desativação do contato.

7 Acoplamento monolítico fluido-estrutura

Para a simulação do problema de interação fluido-estrutura, foi realizado o acoplamento monolítico entre os algoritmos da estrutura com a implementação do contato e do fluido, utilizando o PFEM posicional. Este tipo de acoplamento consiste em integrar os dois problemas (fluido e estrutura) em um único, promovendo a integração dos dois domínios. Para isso, leva-se em conta as contribuições tanto dos elementos de fluido quanto dos elementos de sólido nos nós comuns aos dois meios, obtendo-se um único sistema.

Ao utilizar esse tipo de acoplamento, evita-se erros que possam surgir ao tratar os domínios separados, como defasagem do tempo entre as duas integrações temporais [20] e efeitos massa-adicionada (*added-mass effect*), encontrados com o uso do acoplamento particionado no trabalho de Causin et al. [21].

7.1 Integração temporal e solução pelo método Newton-Raphson

Para a integração no tempo, utiliza-se o algoritmo implícito α -generalizado, proposto por Chung and Hulbert [22] no âmbito da dinâmica das estruturas e estendido para os fluidos por Jansen et al. [23] (para mais detalhes do processo, consultar referências indicadas). A resolução do sistema não-linear, obtido através das equações (8), (10) e (11), é realizado através do método iterativo de Newton-Raphson.

8 Reservatório com comporta em contato com anteparo

Nesta seção é apresentado um exemplo para uma demonstração qualitativa do método proposto. Esse exemplo consiste em um reservatório cuja vazão de escoamento é parcialmente contida através de uma comporta flexível. O escoamento do fluido fletirá a comporta, que entrará em contato com um anteparo rígido semicircular, utilizado para evitar que a base da comporta se desloque muito rapidamente, promovendo o escoamento do fluido para o lado direito do reservatório (dimensões do problema indicadas em metros e propriedades dos materiais ilustradas na Fig. 1 a). As paredes verticais da direita, da esquerda, o fundo do reservatório e o anteparo são considerados rígidos e a parte superior da comporta é considerada engastada. São simuladas duas situações: com e sem a presença do anteparo, durante o tempo de 0.3 segundos, divididos em 500 passos de tempo de 6.10^{-4} segundos. O fluido foi discretizado em 2350 partículas, com viscosidade de $0.1 Pa.s$ e densidade de $10^3 kg/m^3$. Já a comporta e o anteparo semicircular foram discretizados em 42 elementos e 14 elementos, respectivamente, sendo utilizados para a comporta flexível um módulo de elasticidade de $10^5 Pa$, densidade de $2500 kg/m^3$ e coeficiente de Poisson nulo.

Foram utilizados uma baixa rigidez para viga flexível, assim como o coeficiente de Poisson nulo, diferentes dos valores típicos encontrados em estruturas, com o objetivo de obter sua deflexão mais acentuada e necessária ao exemplo, permitindo assim o escoamento do fluido para o lado direito do reservatório.

Para a verificação da abertura da comporta no decorrer da análise, a menor distância entre a base inferior da comporta e o anteparo (no caso com o anteparo) e entre a base inferior da comporta e a base do reservatório, no caso simulado sem o anteparo são monitorados através do tempo e plotados no gráfico da Fig. 1 b). Como pode-se notar, a presença do anteparo impediu que a comporta se deslocasse muito rapidamente.

A Fig. 2 a) mostra o momento em que a comporta entra em contato com o anteparo, no instante 0.018s, sendo indicadas também a distribuições da tensão de Cauchy na direção y. Na Fig. 2 b) e Fig. 2 c) são mostrados os campos de pressão (para o fluido) e as tensões de Cauchy (para o sólido) no instante final da análise (0.3s) para a situação sem e com o anteparo, respectivamente.

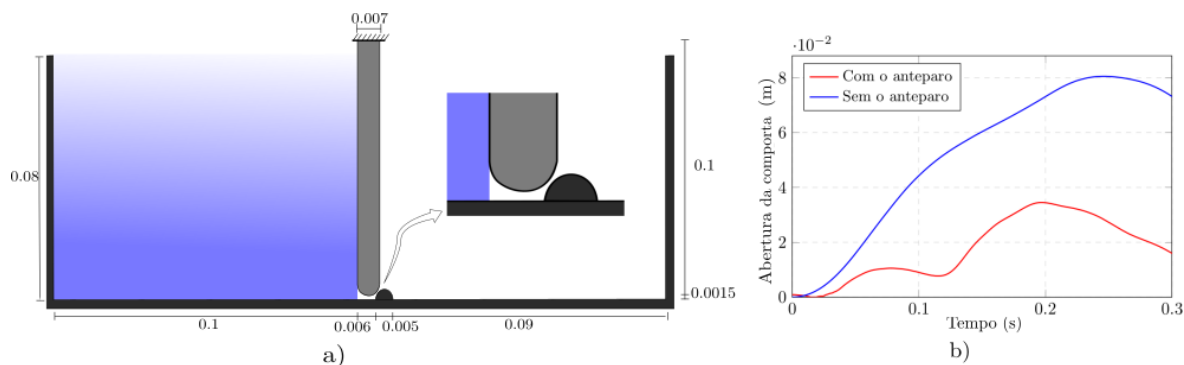


Figura 1. a) Dimensões do reservatório com comporta em contato com anteparo e detalhamento da comporta e anteparo utilizados. b) Abertura da comporta em função do tempo de análise para as duas situações em análise.

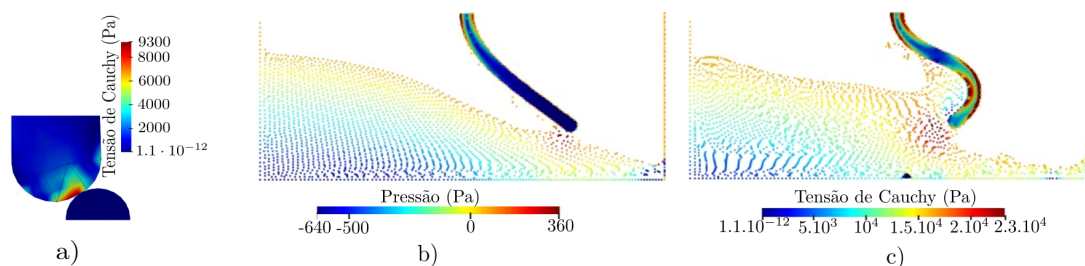


Figura 2. a) Distribuição das tensões de Cauchy na direção y e nas estruturas. b) Distribuição das tensões de Cauchy na direção y e nas estruturas e da pressão no fluido para o caso simulado sem o anteparo e c) com o anteparo.

9 Conclusões

Este trabalho propõe uma formulação baseada no método dos elementos finitos posicional e no método dos elementos finitos e partículas para simular problemas de interação fluido-estrutura associados ao problema do contato estrutural. A associação do MEF posicional ao remalhamento pela triangulação de Delaunay a cada passo de tempo e ao método alpha-shape para reconhecimento do contorno e controle da malha possibilitou a simulação de um problema com mudança topológica no domínio do fluido de maneira satisfatória. Através do exemplo apresentado, é possível comprovar qualitativamente o potencial da formulação para ser aplicada a diversos problemas futuros, incluindo problemas de interação sangue-válvulas vasculares. Em trabalhos futuros a formulação deve ser estudada de forma quantitativa e aprofundada, bem como ser estendida para os problemas 3D.

Agradecimentos. Os autores agradecem à agência brasileira de apoio científico CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo importante auxílio financeiro e ao Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos - USP.

Declaração de autoria. Os autores confirmam que são os únicos responsáveis pela autoria deste trabalho e que todo o material aqui incluído como parte do presente trabalho é propriedade (e autoria) dos autores, ou tem permissão dos proprietários para ser incluído aqui.

Referências

- [1] Akkerman, I., Bazilevs, Y., Benson, D., Farthing, M., & Kees, C., 2012. Free-surface flow and fluid-object interaction modeling with emphasis on ship hydrodynamics. *Journal of Applied Mechanics*, vol. 79.
- [2] Ager, C., Schott, B., Vuong, A.-T., Popp, A., & Wall, W. A., 2019. A consistent approach for fluid-structure-contact interaction based on a porous flow model for rough surface contact. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol. 119, n. 13, pp. 1345–1378.
- [3] Takizawa, K., Bazilevs, Y., Tezduyar, T., & Hsu, M.-C., 2019. Computational cardiovascular flow analysis with the variational multiscale methods. *Journal of Advanced Engineering and Computation*, vol. 3, pp. 366.
- [4] Tezduyar, T., 2006. Interface-tracking and interface-capturing techniques for finite element computation of moving boundaries and interfaces. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 195.
- [5] Sanches, R. A. K. & Coda, H. B., 2014. On fluid-shell coupling using an arbitrary lagrangian-eulerian fluid solver coupled to a positional lagrangian shell solver. *Applied Mathematical Modelling*, vol. 38, pp. 3401–3418.
- [6] Bazilevs, Y., Takizawa, K., & Tezduyar, T. E., 2013. *Computational Fluid-Structure Interaction: Methods and Applications*. John Wiley & Sons, Chichester, UK.
- [7] Fernandes, J. W. D., Barbarulo, A., Ben Dhia, H., & Sanches, R. A. K., 2020. A residual-based stabilized finite element formulation for incompressible flow problems in the arlequin framework. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 370, pp. 113073.
- [8] Gingold, R. A. & Monaghan, J. J., 1977. Smoothed particle hydrodynamics: theory and application to non-spherical stars. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 181, n. 3, pp. 375–389.
- [9] Monaghan, J., 2012. Smoothed particle hydrodynamics and its diverse applications. *Annual Review of Fluid Mechanics*, vol. 44, n. 1, pp. 323–346.
- [10] Idelsohn, S., Oñate, E., & Del Pin, F., 2004. The particle finite element method; a powerful tool to solve incompressible flows with free-surfaces and breaking waves. *Numerical Methods in Engineering*, vol. 61, pp. 964–989.
- [11] Franci, A., Oñate, E., & Carbonell, J. M., 2016. Unified lagrangian formulation for solid and fluid mechanics and fsi problems. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 298, pp. 520–547.
- [12] Coda, H. B., 2003. An exact fem geometric non-linear analysis of frames based on position description. In *International Congress of Mechanical Engineering*. ABCM.
- [13] Avancini, G. & Sanches, R. A., 2020. A total lagrangian position-based finite element formulation for free-surface incompressible flows. *Finite Elements in Analysis and Design*, vol. 169, pp. 103348.
- [14] Mashayekhi, F., Nobari, A., & Zucca, S., 2019. Hybrid reduction of mistuned bladed disks for nonlinear forced response analysis with dry friction. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, vol. 116, pp. 73 – 84.
- [15] Hughes, T. J., Taylor, R. L., Sackman, J. L., Curnier, A., & Kanoknukulchai, W., 1976. A finite element method for a class of contact-impact problems. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 8, n. 3, pp. 249 – 276.
- [16] Puso, M. A. & Laursen, T. A., 2004. A mortar segment-to-segment contact method for large deformation solid mechanics. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 193, n. 6, pp. 601 – 629.
- [17] Tezduyar, T., 1992. Stabilized finite element formulations for incompressible flow computations. In Hutchinson, J. W. & Wu, T. Y., eds, *Advances in Applied Mechanics*, volume 28 of *Advances in Applied Mechanics*, pp. 1 – 44. Elsevier.
- [18] Shewchuk, J., 2002. Delaunay refinement algorithms for triangular mesh generation. *Computational Geometry*, vol. 22, pp. 21–74.
- [19] Edelsbrunner, H. & Mücke, E. P., 1994. Three-dimensional alpha shapes. *ACM Trans. Graph.*, vol. 13, n. 1, pp. 43–72.
- [20] Felippa, C. A., Park, K. C., & Farhat, C., 2001. Partitioned analysis of coupled mechanical systems. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 190, pp. 3247–3270.
- [21] Causin, P., Gerbeau, J., & Nobile, F., 2005. Added-mass effect in the design of partitioned algorithms for fluid–structure problems. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 194, pp. 4506–4527.
- [22] Chung, J. & Hulbert, G. M., 1993. A Time Integration Algorithm for Structural Dynamics With Improved Numerical Dissipation: The Generalized-alpha Method. *Journal of Applied Mechanics*, vol. 60, n. 2, pp. 371–375.
- [23] Jansen, K. E., Whiting, C. H., & Hulbert, G. M., 2000. A generalized-alpha method for integrating the filtered navier–stokes equations with a stabilized finite element method. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 190, n. 3, pp. 305 – 319.