
INTRODUÇÃO

A interação entre fluido-estrutura caracteriza-se por ser uma classe de problemas em que existe uma dependência entre o fluido e a estrutura. O comportamento do fluido depende do formato da estrutura e sua movimentação, assim como, o movimento e a deformação da estrutura dependem das forças atuando na estrutura que provem do fluido.

A modelagem numérica dos problemas da engenharia estrutural é um ramo vastamente desenvolvido, sendo a análise de estruturas por elementos finitos em softwares comerciais uma prática corrente entre os engenheiros. Entretanto, quando fala-se de interação fluido-estrutura (IFE), esses softwares encontram-se muito longe de atender a demanda do mercado.

Problemas que envolvem a interação entre fluido e estrutura estão presentes em diversas áreas da engenharia, pode-se citar, por exemplo, a ação do vento sobre edifícios, aerodinâmica de modelos automotivos, problemas de *flutter* em estruturas aeronáuticas e de pontes, ou ainda problemas de escoamento de sangue sobre vasos sanguíneos e órgãos, entre muitos outros. A análise experimental de tais problemas, em geral, é muito custosa e envolve muito tempo, desta forma, é de interesse entre muitos pesquisadores o desenvolvimento de métodos numéricos que representem adequadamente tais análises e que possibilitem que elas sejam realizadas dentro de uma quantidade de tempo razoável. O crescimento da informática tem auxiliado nesse processo, embora, ainda muitas análises somente sejam possíveis de serem realizadas em grandes *clusters*, e algumas, devido a complexidade dos problemas, não possam ser simuladas sem grandes simplificações.

Os problemas de IFE podem ser decompostos em três partes: dinâmica dos fluidos computacional, mecânica dos sólidos computacional e acoplamento entre os meios fluido e sólido. Uma das maiores dificuldades encontrada nessa área diz respeito ao acoplamento entre fluido e sólido visto que para fluidos aplica-se, em geral, uma descrição matemática euleriana, e para sólidos, lagrangiana. O processo de acoplamento é realizado basicamente

utilizando-se duas possíveis técnicas: método de malhas adaptadas e os métodos de malhas não-adaptadas.

Nos métodos de malhas adaptadas uma porção do contorno da malha de fluido deforma-se de maneira a acomodar a mudança de configuração que a estrutura sofre. Nesse tipo de metodologia uma descrição Lagrangiana-Euleriana arbitrária pode ser aplicada ao fluido, permitindo a movimentação do domínio computacional de maneira independente do domínio do fluido. Esse tipo de técnica é adequada para problemas em que a estrutura sofre pequenos deslocamentos, visto que grandes deslocamentos, em geral, acarretam na necessidade de técnicas de remalhamento, que apresentam um custo computacional muito elevado.

No método de malhas não-adaptadas se utiliza uma malha fixa para o fluido, na qual o sólido se encontra imerso. Um dos aspectos importantes desse método diz respeito a localização do contorno da estrutura dentro da malha do fluido, podendo ser resolvido por exemplo com o uso de uma função *level-set* baseada na distância assinalada ao contorno. Essa técnica, embora possa ser aplicada para grandes deslocamentos, em geral não é adequada para levar em consideração efeitos localizados que precisem de um maior precisão da malha, como por exemplo, em regiões de camada limite na vizinhança da estrutura.

Nesse projeto de doutorado, para análise dos problemas IFE, propõe-se o desenvolvimento de uma técnica multiescala de malhas sobrepostas com intuito de unir as vantagens das metodologias de malhas adaptadas e de malhas não-adaptadas. Na metodologia, propõe-se o uso de duas malhas para a discretização do fluido, uma malha global maior, menos refinada e fixa no espaço, e uma malha local menor, mais refinada, em contato com a estrutura e que se move para acomodar as deformações da estrutura. Como consequência, caso seja necessário a realização de remalhamento, o mesmo pode ser realizado apenas na malha local, diminuindo o custo computacional. As malhas serão acopladas através da modificação do espaço das funções base em uma zona de sobreposição, de maneira a preservar a independência linear das funções e a partição da unidade. Pode-se utilizar diferentes aproximações para as malhas global e local. Nesse trabalho, a malha local será discretizada utilizando análise isogeométrica, enquanto que para a malha global, método dos elementos finitos será aplicado.

Nesse capítulo serão apresentados o estado da arte dos principais assuntos envolvidos no desenvolvimento desse projeto, os objetivos, e a metodologia aplicada para a realização do mesmo.

1.1 Apresentação da qualificação

O texto de qualificação da tese de doutorado está dividido em 6 capítulos os quais serão descritos sucintamente na continuação.

No *Capítulo 1* introduz-se e contextualiza-se o tema de pesquisa. Na sequência, no

estado da arte, faz-se uma breve apresentação de algumas das técnicas mais utilizadas para a solução dos problemas que envolvem a interação fluido-estrutura. Por fim, apresentam-se os objetivos, a metodologia e justificativa para a realização desse projeto.

O *Capítulo 2* compreende na descrição dos temas relevantes à dinâmica dos fluidos computacional. Apresentam-se inicialmente as equações governantes em sua forma forte, e na sequência em sua forma fraca discretizadas espacialmente utilizando uma descrição Euleriana-Lagrangiana arbitrária. Após isso, descrevem-se as estabilizações para contornar as típicas instabilidades que ocorrem nesse tipo de discretização, seguida da integração temporal do conjunto de equações. Ao final um algoritmo que descreve a implementação computacional é apresentado e alguns exemplos para a validação são avaliados.

No *Capítulo 3* a apresentação da análise isogeométrica é realizada. Descrevem-se as típicas funções NURBS e sua aplicação na discretização das geometrias e variáveis em substituição às tradicionais funções aplicadas no método dos elementos finitos. Por fim, valida-se a formulação aplicando-a em problemas da dinâmica dos fluidos computacional.

O *Capítulo 4* apresenta uma breve revisão sobre a mecânica dos sólidos voltada ao equilíbrio de corpos deformáveis em descrição Lagrangiana. Na sequência, apresentam-se os conceitos do método dos elementos finitos posicional e do elemento finito de casca a ser utilizado nesse projeto. Por fim, a metodologia de integração temporal e o algoritmo implementado são descritos. Para validar tal formulação um problema é resolvido.

No *Capítulo 5* a técnica de decomposição de domínios é apresentada. Descreve-se a obtenção do novo espaço de funções na zona de sobreposição entre malhas global e local, e apresenta-se por fim um exemplo de validação voltado a dinâmica dos fluidos computacional.

Finalmente, no *Capítulo 6* o plano de trabalho que será executado na conclusão do doutorado é apresentado, bem como as considerações finais sobre o tema já estudado.

1.2 Estado da Arte

No estado da arte apresenta-se uma breve contextualização das teorias e técnicas mais importantes relacionadas a metodologia aplica nesse projeto para a resolução dos problemas de interação fluido-estrutura.

1.2.1 *Análise computacional de escoamentos com contornos móveis*

Na dinâmica dos fluidos computacional (DFC) técnicas numéricas são aplicadas para obtenção de uma solução aproximada para o conjunto de equações que descreve o comportamento dos fluidos no espaço e no tempo, visto que a solução analítica para esses problemas é conhecida para poucos e simples casos. Os principais tópicos a serem

abordados referentes as diferentes metodologias aplicadas dizem respeito a: discretização espacial, métodos de estabilização e modelagem de escoamentos turbulentos.

No que diz respeito a discretização espacial a DFC desenvolveu-se inicialmente no âmbito do método das diferenças finitas e no método dos volumes finitos (ver, por exemplo, ??) e ??)). O método dos elementos finitos (MEF), por sua vez, popularizou-se inicialmente em análises de estruturas na década de 50 com problemas baseados em princípios variacionais. Alguns anos depois, passou a ser usado em problemas da DFC, visto que o mesmo apresenta algumas propriedades vantajosas, como por exemplo, a capacidade de discretizar geometrias complexas com o uso de malhas não estruturadas arbitrárias e a facilidade de aplicação de condições de contorno de alta ordem (????).

Umas das dificuldades encontradas na aplicação do MEF à dinâmica dos fluidos computacional é o fato que ao adotar-se o método clássico de Galerkin na discretização espacial das equações que descrevem o comportamento dos fluidos, em escoamentos com convecção dominante, obtém-se matrizes assimétricas e variações espúrias nas variáveis analisadas. Esse problema pode ser contornado a medida que a malha de elementos finitos é refinada. Entretanto, é desejável se estabilizar os resultados mesmo em malhas mais grosseiras.

Para resolver tal dificuldade, pode-se aplicar, por exemplo a metodologia *Stream-Upwind/Petrov-Galerkin* - SUPG (??), *Galerkin Least-Squares*-GLS (??) , *Sub-Grid Scale*-SGS (??), ou ainda, *Consistent Approximate Upwind*-CAU (??). Todas essas técnicas baseiam-se na introdução de um termo de viscosidade artificial ao problema, contendo as variações espúrias que ocorrem em problemas com convecção dominante.

Outra possibilidade, diz respeito ao uso do método Taylor-Galerkin (T-G), introduzido por ??) onde a estabilização é obtida pela introdução de termos de mais alta ordem para a expansão em série de Taylor no processo de discretização temporal.

Uma das metodologia mais difundida é a técnica SUPG, aplicada nesse trabalho, que consiste em adicionar à forma fraca da equação da quantidade de movimento, o resíduo da equação da quantidade de movimento ponderada por uma função especialmente escolhida para adicionar uma difusão artificial no problema na direção das linhas de corrente. Diversos autores contribuíram para a conciliação desta técnica, entre os quais podemos citar, ??), ??), ??).

Na metodologia SUPG tem-se um parâmetro adimensional estabilizador, cuja obtenção é discutida em diversos trabalhos, sendo alguns dos mais recentes, os de ??) e ??).

Outra dificuldade da DFC diz respeito aos escoamentos incompressíveis. Ao levar-se em conta a incompressibilidade do escoamento, obtém-se a chamada equação da continuidade, onde tem-se apenas o termo do divergente do vetor velocidade. Do ponto de vista computacional, este aspecto traz problemas na obtenção do campo de pressão. Nesses casos, a utilização da pressão e da velocidade como variáveis primárias com funções

de forma de mesmo grau pode conduzir instabilidades na resolução do sistema. Essas instabilidades podem ser contornadas utilizando a restrição de *Ladyzhenskaya-Babuška-Brezzi* ou LBB, nesse caso a pressão é interpolada por funções de forma de ordem menor, sendo os elementos conhecidos como Taylor-Hood (??????).

Uma metodologia de estabilização semelhante à técnica SUPG foi também desenvolvida por (????) para contornar esse problema. Essa metodologia é conhecida como PSPG (*Pressure stabilized Petrov-Galerkin*) e consiste em adicionar a forma fraca da equação da continuidade o resíduo da equação da quantidade de movimento ponderado pelo gradiente da equação da continuidade multiplicado por uma constante estabilizadora.

Outro aspecto relevante nas simulações numéricas diz respeito à reprodução de escoamentos turbulentos. As equações de Navier-Stokes tem validade tanto para escoamentos laminares como para turbulentos. Entretanto, a utilização da chamada Simulação Direta de Turbulência leva a custos computacionais elevados, visto que requer uma malha refinada de maneira a representar adequadamente todas as escadas de turbulência. Para contornar esse problema diferentes técnicas podem sere empregadas, como por exemplo, modelos algébricos de turbulência, baseados na hipótese de Reynolds, simulações de grandes vórtices (LES) (????) e também métodos multiescalas (????).

1.2.2 *Análise Isogeométrica*

A Análise Isogeométrica (IGA - *Isogeometric Analysis*) é uma metodologia para análise numérica de problemas descritos por equações diferenciais e foi introduzida primeiramente por ??). Pode-se dizer que se trata de uma generalização do método dos elementos finitos clássico, a partir do uso de funções base especiais, e sua formulação foi consolidada através de inúmeros trabalhos sequentes, como por exemplo, ??????????????).

Na análise isogeométrica as funções base utilizadas são aquelas aplicadas nos sistemas CAD (*Computed Aided Desing*), ou seja, nas tecnologias aplicadas na engenharia de *design*, animação, artes gráficas e visualização. Dentro das possibilidades de funções, as mais conhecidas são as funções NURBS (??), fazendo que esse seja um ponto de partida para os estudos sobre IGA.

Um dos principais objetivos do desenvolvimento dessa ferramenta é a integração entre os sistemas CAD e as técnicas numéricas baseadas em elementos finitos, as quais requerem a geração de malhas baseadas nos dados obtidos em programas CAD.

Uma das principais vantagens do uso dessa metodologia é representação exata de geometrias mesmo em malhas pouco refinadas, visto que elas são capazes de representar exatamente seções cônicas, círculos, cilindros, esferas e elipsoides. Essa característica é muito atrativa, por exemplo, em problemas de flambagem de cascas, os quais são extremamente sensíveis a imperfeições geométricas, além disso, as funções NURBS são contínuas $p - 1$ vezes entre os elementos, sendo p o grau da função base, o que pode ser uma característica interessante para esse tipo de problema que requer continuidade C^1

entre elementos. Trabalhos como os de [10] demonstram a aplicabilidade da IGA na análise de problemas de cascas.

A descrição exata da geometria das funções NURBS é uma característica desejável também em problemas que envolvem fenômenos de camada limite, os quais dependem fortemente da precisão geométrica da superfície do corpo imerso no escoamento. Alguns problemas envolvendo escoamentos turbulentos e interação fluido-estrutura, podem ser consultados em: [11]).

Outras metodologias aplicando diretamente funções *B-Splines* também tem se mostrado eficiente para a análise de problemas da dinâmica dos fluidos computacional, como pode ser visto nos trabalhos de [12]).

Neste projeto, a aproximação IGA, baseada em funções NURBS, é aplicada parcialmente a malha de fluidos utilizada nas análises de interação entre fluido estrutura, como será visto em mais detalhes na sequência.

1.2.3 Análise dinâmica de estruturas considerando grandes deslocamentos

A análise de interação fluido estrutura recai muitas vezes em problemas onde é necessário a consideração da não linearidade geométrica de estruturas, devido a grandes deslocamentos, ou a efeitos acoplados de membrana e flexão. Dentro desse grupo problemas pode-se citar: *flutter* de grande amplitude, sistemas de desaceleração (paraquedas), aplicações biomédicas, entre outros.

A solução numérica de problemas estruturais é realizada tradicionalmente aplicando-se o método dos elementos finitos. Dentro do contexto da análise não-linear de estruturas utilizando MEF a formulação co-rotacional, proposta por [13]), é muito popular e propõe a representação cinemática de algumas estruturas submetidas a grandes deslocamentos através da representação de deformações em termos de deslocamentos nodais e rotações. Essa formulação, aplicada para pórticos, treliças e cascas, pode ser vista nos trabalhos de [14]).

A formulação co-rotacional, ao descrever rotações como parâmetros nodais, apresenta uma limitação para grandes deslocamentos, visto que não se pode aplicar a propriedade comutativa a essa grandeza. Para resolver este problema, utilizam-se formulações linearizadas de Euler-Rodrigues para aproximação das rotações, conforme pode ser visto em [15]).

A conservação da energia nessa formulação é um assunto muito controverso em problemas de dinâmica não-linear de estruturas. Isso porque no uso da formulação co-rotacional, as rotações finitas que são parâmetros nodais apresentam objetividade apenas para pequenos incrementos, além disso, a aplicação da formulação resulta em matriz de massa variável, proibindo o uso de algumas processos de integração temporal bem

estabelecidos.

Motivado por ??, ??) introduz uma formulação baseada em posições e não mais em rotações para elementos finitos de pórticos. Essa formulação tem sido aplicada com sucesso para problemas de pórticos e cascas (????????) e também em problemas de interação fluido-estrutura (??????).

Em ??) os autores utilizam o integrador temporal de Newmark para análise de problemas dinâmicos não-lineares de estruturas de cascas no contexto da IFE para grandes deslocamentos e rotações de corpo rígido. Nesse trabalho, os autores apresentam a prova da conservação da quantidade de movimento linear e angular no uso dessa metodologia, e testam a estabilidade e conservação de energia para problemas com pequenas deformações.

Baseado neste último trabalho citado, neste projeto, aplica-se uma formulação Lagrangiana total para elementos de cascas baseada em posições e vetores generalizados, o que evite o uso de aproximações para grandes rotações e permite o uso do integrador de Newmark nos problemas dinâmicos da IFE que apresentam grandes deslocamentos e rotações de corpo rígido.

1.2.4 *Acoplamento fluido-estrutura*

O problema de interação entre fluido-estrutura pode ser descrito como um conjunto de equações diferenciais e condições de contornos associadas ao fluido e a estrutura que precisam ser satisfeitas ao mesmo tempo. Os domínios do fluido e da estrutura não se sobrepõem e devem se acoplar na interface entre o fluido e a estrutura.

Como sólidos e fluidos geralmente apresentam descrições matemáticas diferentes, sendo os sólidos tradicionalmente analisados por descrições Lagrangianas e os fluidos por descrições Eulerianas, um dos desafios da IFE é o acoplamento entre os dois meios. A solução a ser aplicada pode ser classificada em dois tipos de metodologias: Métodos de rastreamento de interface (*interface tracking*) ou método de malhas adaptadas e Métodos de captura de interface (*interface capturing*) ou método de malhas não-adaptadas (????).

Nos métodos de rastreamento de interface, a medida que a interface move, o domínio espacial do fluido muda seu formato, e a malha se movimenta para acomodar a mudança da interface. Nesse tipo de metodologia duas possíveis técnicas podem ser aplicadas, uma descrição Lagrangiana-Euleriana arbitrária (??????) ou técnicas que apliquem a metodologia Espaço-Tempo (*Space-Time - ST*) (??????). A principal vantagem do método de malhas adaptadas é a capacidade de controlar a dimensão da malha próxima a interface e como consequência a precisão dos resultados nessa região.

A técnica de movimentação de malhas é muito importante nesse tipo de problemas, pois deve ser eficiente de maneira a resultar em elementos que possuam uma mínima distorção e alteração de volume, e de forma a evitar que o remalhamento seja executado. Alguns trabalhos sobre movimentação de malhas podem ser vistos em: ??????????????). Neste tipo de metodologia, entretanto, em alguns casos o remalhamento torna-se inevitável,

como em alguns problemas com grandes deslocamentos ou em problemas com mudanças topológicas, nessas situações, o custo computacional se torna muito elevado.

Por sua vez, os métodos de captura de interface são capazes de lidar com mudanças topológicas e grandes deslocamentos. Para isso, utilizam-se os chamados métodos de contornos imersos, introduzido por [10], nos quais mantém-se a malha fixa do fluido e a cada passo de tempo é necessário que as posições da estrutura sejam identificadas dentro da malha do fluido ([11]). Dentro dessa metodologia, a cada passo de tempo a estrutura pode ser identificada, por exemplo, por uma função distância assinalada (método *level-set*) como pode ser visto nos trabalhos de [12]. A desvantagem desse tipo de metodologia é que a resolução na camada limite ficará limitada a discretização da malha de elementos finitos na posição onde a interface está posicionada no passo de tempo de análise.

De acordo com a classificação apresentada em [13] a resolução dos problemas da IFE pode ser realizada através de duas variações: Métodos fracamente acoplados ou particionados e métodos fortemente acoplados ou monolíticos. No primeiro grupo, as equações para fluido, estrutura e de movimentação de malha são resolvidas sequencialmente de uma maneira desacoplada. A cada passo de tempo, as forças do fluido são computadas em uma malha fixa e transferidas na sequência à estrutura que é calculada e fornece as posições finais da interface para o cálculo da movimentação da malha. Esse tipo de metodologia facilita a solução dos problemas de IFE devido ao total desacoplamento entre os *solvers* de estrutura e de fluido, entretanto, problemas de convergência podem ser encontrados em alguns problemas.

O segundo grupo, de métodos fortemente acoplados, é sub-dividido em três categorias de acordo com os autores previamente citados: técnica direta, técnica de bloco-iterativo e técnica quase-direta. Na técnica direta, as equações governantes do fluido, estrutura e movimentação da malha são resolvidas concomitantemente em um único sistema de equações algébricas, de modo que as condições de interface são atendidas implicitamente durante a solução. Nesse grupo de análises, pode-se citar os trabalhos de [14]). Essa técnica conduz a boa convergência do problema, entretanto, devido aos grandes sistemas algébricos resultantes ocorre um aumento no custo computacional.

Na técnica de bloco-iterativo, o fluido e a estrutura são tratados com discretizações e métodos numéricos distintos, sendo o acoplamento realizado por meio da transferência de condições de contorno na interface. A diferença dessa metodologia aos métodos fracamente acoplados, é que dentro de um passo de tempo, a cada iteração existe a transferência de informações entre as equações do fluido, estrutura e movimentação da malha ([15]).

Em alguns problemas onde a massa do fluido envolvida é semelhante ou superior a massa da estrutura, pode-se ter uma divergência dos resultados da técnica de bloco-iterativo, nesses casos, pode-se utilizar a metodologia introduzida por [16], chamada de *augmented mass* que consiste em multiplicar a massa da matriz tangente respectiva à estrutura por um fator que dependerá do tipo de problema em análise. Outra técnica que

pode ser utilizada é a alteração do esquema de acoplamento do tipo Dirichlet-Neumann para condições de contorno de Robin, que consiste em uma combinação linear das condições de Dirichlet e Neumann, ver por exemplo, ??). Pode-se utilizar ainda a relaxação de Aitken, proposto por ??), e que demonstrou-se muito eficiente e trabalhos seguintes (????).

A técnica acoplamento quase-direto, garante boa convergência independente da magnitude das variáveis do fluido e da estrutura. Nessa metodologia tem-se dois blocos de equações, um composto por aquelas provenientes do fluido e estrutura que serão resolvidos em um único sistema algébrico, e o outro respectivo a movimentação da malha. O processo de solução entre os dois blocos é iterativo, com a movimentação da malha sendo executada a cada iteração a partir dos dados provenientes do primeiro bloco (????).

1.2.5 *Técnica de partição de domínios*

Em diversas áreas da engenharia se faz necessário levar em consideração efeitos localizados, geralmente de menor escala, em um modelo global. Dentro da análise estrutural pode-se citar problemas de fissuras, orifícios, imperfeições; na mecânica dos fluidos, problemas de camada limite, a interface entre dois fluidos; e na interação fluido-estrutura a interface entre estrutura-fluido, entre outros.

Para uma solução precisa desse tipo de problemas, faz-se necessário a aplicação de técnicas que levem em consideração os efeitos locais, mas ao mesmo tempo não tornem a simulação inviável devido ao seu custo computacional.

O método dos elementos finitos, tradicionalmente aplicado para as análises numéricas de equações diferenciais, foi desenvolvido a partir de um modelo mecânico de meio contínuo, apresentando pouca flexibilidade para a consideração desses efeitos. Os refinamentos p e h são metodologias eficientes, entretanto, para alguns problemas dinâmicos, demandam técnicas de remalhamento, e podem ser muito caros computacionalmente.

Buscando uma melhoria nesse aspecto do MEF, muitas propostas têm sido realizadas para melhorar a flexibilidade de problemas multiescala, como pode-se citar por exemplo, o caso dos elementos finitos difusos (??) onde o conceito de partículas foi introduzido, resultando em uma generalização do método dos elementos finitos sem malha, ou o método de Galerkin livre de elementos que é combinação entre elementos sem malha e o MEF, ver ??). Com esse mesmo intuito pode-se citar o método de Partição da Unidade (??), o método dos elementos finitos generalizado (??) ou o método dos elementos finitos estendido (??), os quais introduzem o enriquecimento à base aproximadora por meio de funções capazes de capturar efeitos localizados.

Dentro do contexto da mecânica dos fluidos, (????) introduziram a técnica *EDICT* (*Enhanced-Discretization Interface-Capturing Technique*) para captura de interface com aprimoramento da discretização para problemas bifásicos ou com superfície livre. Para isso, nessa região de interface definem-se um subconjunto de elementos (sub-malhas), que posteriormente são refinados sucessivamente, de modo a melhorar a precisão da

solução. Como resultado obtém-se uma discretização melhorada para capturar a interface, entretanto, as sub-malhas provenientes, não representam com exatidão descontinuidades na interface. Uma versão mais eficiente dessa técnica foi proposta em ??), na qual um método iterativo multinível é projetado para a captura de efeitos do escoamento em pequenas escalas, permitindo a simulação de problemas mais complexos.

Outro grupo de métodos é proposta para flexibilizar o MEF em problemas com efeitos locais, que são os baseados em superposição de um domínio local a um domínio global. A técnica Chimera definida por ??) traz a introdução de orifícios na região de superposição dos modelos, definindo um contorno artificial para o modelo global, e a transmissão de dados ocorre através desses contornos artificiais gerados. O método S (??) trata o modelo local como um enriquecimento ao global, e a solução é obtida através da soma dos campos de interesse de cada domínio.

O método Arlequin (????), por sua vez também baseia-se na superposição de modelos de modo a combinar um modelo local mais refinado a um global, no entanto, esse processo é realizado através do cruzamento e colagem entre os modelos em uma zona de superposição e fazendo-se o uso para tal de multiplicadores de Lagrange. A desvantagem do método de Arlequin, é a introdução mais variáveis ao sistema, e como consequência um sistema mais difícil de ser tratado.

Com esse mesmo intuito, e pretendendo superar algumas dificuldades dos métodos anteriores, nesse trabalho adota-se uma metodologia de sobreposição de domínios, uma malha local mais refinada é adicionada a um domínio global, com discretização mais grosseira. Nessa técnica, as funções base de ambas discretizações são modificadas em uma zona de sobreposição através de uma função ponderadora e somadas. Esse novo campo de funções possui independência linear e cumpre com a partição da unidade.

1.3 Objetivos

O objetivo principal desse trabalho é construir um código computacional capaz de realizar simulações de interação fluido-estrutura para problemas bidimensionais e tridimensionais utilizando uma combinação entre elementos finitos tradicionais e análise isogeométrica. Além disso, pretende-se trabalhar com uma técnica multiescala, particionando a malha de elementos do fluido em um modelo global e um modelo local que possua uma discretização adequada para levar em consideração efeitos localizados que possam existir na análise dos problemas de IFE.

De maneira a se alcançar o objetivo global, os seguintes objetivos secundários devem ser cumpridos:

- Expandir um código de MEF bidimensional de dinâmica dos fluidos pré-existente para um código que também analise problemas tridimensionais e que contemple uma

discretização através de análise isogeométrica;

- Implementar uma técnica de sobreposição de malhas para levar em conta efeitos locais ao código de dinâmica dos fluidos computacional;
- Desenvolver um código para análise de estruturas de cascas utilizando o MEF posicional;
- Realizar o acoplamento entre os códigos da dinâmica dos fluidos computacional com o código de estruturas;
- Validar os códigos anteriores através da simulação de problemas da dinâmica dos fluidos, dinâmica das estruturas e problemas IFE.

1.4 Metodologia

Em função da complexidade envolvida na implementação computacional dos códigos da dinâmica dos fluidos, dinâmica das estruturas e de interação fluido-estrutura optou-se pelo desenvolvimento dos mesmos em linguagem de programação C++ orientada a objetos, visto que esta linguagem já vem sendo utilizada com sucesso no grupo de trabalho da presente estudante de doutorado. Além disso, a programação orientada a objetos proporciona uma maior modularidade dos códigos desenvolvidos e uma maior facilidade para o acoplamento entre módulos distintos. Todas as implementações são realizadas utilizando bibliotecas, compiladores e softwares livres ou de código aberto, em ambiente Linux.

O projeto de pesquisa iniciou-se tendo como base um código de dinâmica dos fluidos computacional para análises bidimensionais desenvolvido por ??) em seus trabalhos de doutorado e de mestrado. Primeiramente, ampliou-se o código pré-existente de maneira que o mesmo contemplasse análises de problemas tridimensionais. Na sequência, incluiu-se a este código baseado em MEF para análises 2D e 3D da DFC a técnica de análise isogeométrica.

A partir desse ponto, iniciou-se o processo de estudo da metodologia de sobreposição de malhas de modelos locais à malhas de modelos globais, e sua implementação foi realizada primeiramente para problemas bidimensionais. Na continuação desse projeto esse código será expandido para contemplar também problemas tridimensionais.

Para a implementação do problema de estruturas de cascas baseado no MEF posicional, utilizou-se como base os textos apresentados em ??????), e aplicou-se a mesma estrutura de dados usada no código de dinâmica dos fluidos computacional.

Na sequência deste projeto, será realizado o acoplamento entre os códigos de fluidos e de estrutura, utilizando-se a metodologia de acoplamento forte através de bloco-iterativo

e empregando a estratégia de relaxação de Aitken com o objetivo de acelerar a convergência do processo iterativo.

Para maior eficiência na resolução dos problemas, os códigos apresentam paralelização em protocolo MPI (*Message passing interface*). O processamento paralelo acontece a partir da divisão do domínio de elementos finitos entre os processos, o qual é realizado através da biblioteca METIS¹. O METIS proporciona divisão do domínio de elementos finitos em número semelhantes de elementos entre os processos e agrupando-os por proximidade geométrica.

É importante ressaltar que os códigos contam com a interface e implementações do pacote PETSc². Essa biblioteca é desenvolvida em código aberto e possui uma grande quantidade de método iterativos e diretos para solução de sistemas algébricos e também de pré-condicionadores. Além do mais, o PETSc possui uma interface bem desenvolvida com outras bibliotecas, como por exemplo, com o METIS citado anteriormente. No âmbito da resolução dos problemas algébricos nesta primeira fase foi utilizada a biblioteca MUMPS³ que trata-se um método direto de solução de sistemas lineares e é uma biblioteca em código aberto.

As malhas de elementos finitos utilizadas nas análises são obtidas através do software GMSH⁴ e a etapa de pós-processamento e visualização é realizada no PARAVIEW⁵. Para problemas aplicando a análise isogeométrica, a etapa de pré-processamento é realizada com um código desenvolvido pela autora desse trabalho em seu trabalho de mestrado.

No que diz respeito à infraestrutura, utiliza-se o *cluster* disponível no Laboratório de Informática e de Mecânica Computacional (LIMC) do SET para a simulação de problemas mais complexos, e um computador pessoal para a simulação de problemas mais simples.

1.5 Justificativa

Os problemas de interação fluido-estrutura estão presentes em todas as partes, na engenharia, nas ciências, na medicina e também no dia-a-dia das pessoas. O projeto de estruturas cada vez mais esbeltas, a necessidade de obtenção de energia elétrica a partir de fontes de energia limpa, como as usinas eólicas, o estudo de *airbags*, o bombeamento do sangue pelos ventrículos do coração humano e o abrir e fechar das válvulas do coração, são apenas alguns dos exemplos que demonstram a necessidade de se aprofundar nos estudos da interação fluido-estrutura computacional.

Enquanto que no campo engenharia estrutural os pacotes comerciais baseados em MEF estão em constante evolução, e podem resolver uma grande gama de problemas, os

¹ Disponível em: <<http://glaros.dtc.umn.edu/gkhome/metis/metis/overview>>

² Disponível em: <<http://https://www.mcs.anl.gov/petsc/>>

³ Disponível em: <<http://mumps.enseiht.fr/>>

⁴ Disponível em: <<https://gmsh.info/>>

⁵ Disponível em: <<http://https://www.paraview.org/>>

softwares que tratam de problemas da dinâmica dos fluidos computacional e de problemas multifísicos, como os problemas da IFE, ainda precisam evoluir muito para suprirem a demanda dos pesquisadores. A simulação numérica de problemas reais de IFE é ainda muito difícil de ser realizada em função do elevado custo computacional, e muitas vezes, devido a grande complexidade dos problemas, ainda é impossível simulá-los sem que sejam realizados grandes simplificações. Dessa forma, os ensaios experimentais, ainda são em grande parte das vezes, a melhor forma de se estudar o comportamento de IFE, embora, sejam muito custosos e demorados.

Dentro desse contexto, muitos pesquisadores tem se esforçado para a análise de problemas da IFE através de análises numéricas sejam possíveis e eficientes. Com essa mesma proposta, nesse projeto propõe-se o desenvolvimento de uma ferramenta computacional eficiente para análise tridimensional de problemas de interação fluido-estrutura utilizando uma combinação entre método dos elementos finitos e análise isogeométrica. Nesse trabalho, será aplicada uma técnica de sobreposição de malhas com método multiescala ao modelo do fluido, com uma malha local mais refinada e deformável em contato com a superfície da estrutura sobreposta a uma malha global fixa e com discretização mais grosseira. Dessa forma, ainda que a estrutura mude drasticamente, não se faz necessário o remalhamento de toda a malha que compõe o fluido, diminuindo assim o custo computacional. Esta proposta compartilha dessa forma as vantagens dos métodos de malhas adaptadas e de malhas não adaptadas, possuindo a possibilidade de alcançar uma ótima convergência.