

1

Introdução

Fluidos, sejam líquidos ou gases, desempenham um importante papel na natureza. Muitos fenômenos físicos podem ser estudados e explicados pela dinâmica dos fluidos, dentre os quais podemos citar, como exemplos, o escoamento de líquidos e gases dentro ou ao redor de equipamentos, o movimento das marés, os fenômenos atmosféricos, entre outros.

A dinâmica dos fluidos estuda os efeitos das forças aplicadas ao fluido. A análise de qualquer problema em dinâmica dos fluidos começa, necessariamente, seja de modo direto ou indireto, com a aplicação das leis básicas que regem o seu movimento. As leis básicas aplicáveis a qualquer fluido são:

1. Conservação de massa.
2. A segunda lei de Newton para o movimento.
3. O princípio da quantidade de movimento angular.
4. A primeira lei da termodinâmica.
5. A segunda lei da termodinâmica.

Obviamente, nem todas as leis básicas são necessárias para resolver um determinado problema. No entanto, em alguns casos, torna-se necessário o uso de outras equações, tais como as equações de estado ou outras de caráter constitutivo, para descrever o comportamento das propriedades dos fluidos sob determinadas condições. Como as leis básicas são descritas por meio de equações diferenciais, o comportamento de um fluido é modelado através de um sistema de equações diferenciais parciais sujeito às condições iniciais e de contorno. No entanto, esse sistema dificilmente apresenta solução analítica.

Neste contexto, as aplicações que envolvem Dinâmica dos Fluidos Computacional (DFC) têm sido utilizadas crescentemente em diversas áreas. A Dinâmica dos Fluidos Computacional visa a encontrar, através da utilização de métodos numéricos, uma aproximação satisfatória para descrever com certa precisão o comportamento de um fluido. Existem dois tipos de abordagem que podem ser usados na dinâmica dos fluidos para solucionar problemas que

envolvam fluidos: os métodos baseados em malhas (*Grid-based methods*) e os métodos onde a presença de uma malha não é necessária (*Particle-based methods*).

Os métodos baseados em malhas mais conhecidos e utilizados são: o método das Diferenças Finitas, o método dos Elementos Finitos e o método dos Volumes Finitos. Esses métodos são de natureza Euleriana e necessitam de malhas para caracterizar a geometria dos modelos. Os modelos, por sua vez, devem ser sofisticados para possibilitar a simulação de fenômenos que são não lineares. Além disso, são necessárias ferramentas para a criação das malhas que, para modelos complexos, são extremamente sofisticadas e em alguns casos tornam-se inviáveis (Tsukamoto, 2006).

Já nos métodos livres de malhas, essa dificuldade é contornada, pois os fluidos e sólidos são modelados por partículas sem a necessidade da criação de malhas. Dentre esses métodos destacam-se o *Moving Particle Semi-Implicit Method* (método MPS – Koshizuka *et al.*, 1995; Koshizuka e Oka, 1996) e o *Smoothed Particle Hydrodynamics Method* (método SPH – Lucy, 1977; Gingold e Monaghan, 1977).

Nos métodos Lagrangeanos baseados em partículas MPS e SPH, as grandezas físicas (massa, energia, densidade, etc.) estão associadas às partículas que se movem junto com o fluido. Por outro lado, nos métodos Eulerianos baseados em malha, onde o conceito de campo é fundamental, as grandezas físicas são obtidas para cada ponto espacial da malha em cada instante de tempo. No lugar das malhas, os métodos MPS e SPH utilizam uma função de suavização, também conhecida como função peso, para interpolar os valores das grandezas físicas em qualquer ponto do domínio.

Segundo Liu e Liu (2003), a facilidade no tratamento de grandes deformações, a maior facilidade na representação de geometrias complexas, a maior capacidade na identificação de superfícies livres, de interfaces móveis e de fronteiras deformáveis podem ser consideradas como vantagens dos métodos Lagrangeanos baseados em partículas em relação aos métodos Eulerianos baseados em malhas.

O presente trabalho tem como objetivo fazer um estudo comparativo de eficiência e acurácia entre o método SPH baseado no trabalho de Liu e Liu (2003)

e o método MPS baseado no trabalho de Koshizuka e Oka (1996). As principais contribuições desta dissertação são:

- Realizar um estudo investigativo capaz de proporcionar a compreensão dos métodos MPS e SPH.
- Implementar e validar os métodos MPS e SPH.
- Fazer uma análise comparativa dos métodos apontando em que situações cada um deve ser utilizado.

A análise da acurácia dos métodos MPS e SPH será realizada tendo como referência o método dos Volumes Finitos e o método VOF (*Volume of Fluid*), implementados no *software* FLUENT[®], que é largamente utilizado na indústria e no mundo acadêmico. A comparação da eficiência entre os métodos será realizada através da determinação do tempo de processamento em função do número de partículas.

1.1. Revisão da Literatura

Nesta seção, serão apresentados os trabalhos de maior relevância relacionados à simulação de fluidos utilizando-se os métodos MPS e SPH.

O método de partículas SPH foi desenvolvido por Lucy (1977) e Gingold e Monaghan (1977). Originalmente, o método SPH foi desenvolvido para a modelagem e simulação de problemas astrofísicos, sendo posteriormente estendido para aplicações em mecânica dos fluidos. Em 1983, Monaghan e Gingold aplicaram o método SPH para simular o problema do tubo de choque (*shock tube*) em uma dimensão. Neste trabalho, os autores propuseram uma nova forma de viscosidade artificial com a finalidade de eliminar os problemas de oscilação excessiva da frente da onda de choque. Os resultados obtidos com a nova forma de viscosidade artificial foram bastante satisfatórios. Monaghan (1988) aplicou o método SPH para simular diversos tipos de problemas de fluidos compressíveis. Neste trabalho, ficou clara a dificuldade de modelagem de fronteiras sólidas e a necessidade de se utilizar uma velocidade média local para realizar o movimento das partículas.

Em 1994, Monaghan estendeu o método SPH para aplicação em escoamentos de fluido incompressível. Neste trabalho, Monaghan utilizou uma

equação de estado, apresentada em Batchelor (1967), que considera que o fluido é levemente compressível. Além disso, Monaghan (1994) modelou as fronteiras sólidas utilizando partículas que exerciam uma força de repulsão nas partículas de fluido. Essa força repulsiva foi calculada utilizando uma aproximação similar à empregada pela fórmula de Lennard-Jones para calcular a força molecular. A densidade de cada partícula foi calculada aplicando-se o método SPH na equação da continuidade.

Para a evolução do sistema de partículas, Monaghan (1994) utilizou a técnica XSPH. Esta técnica faz com que as partículas se movimentem de uma forma mais ordenada e previne a sobreposição entre as partículas de fluido. O problema de quebra de barragem (*dam collapse*) foi simulado com sucesso pelo método SPH (Figura 1), porém, segundo o autor, a utilização de uma equação de estado artificial implicava no uso de um passo de tempo menor que o desejado.

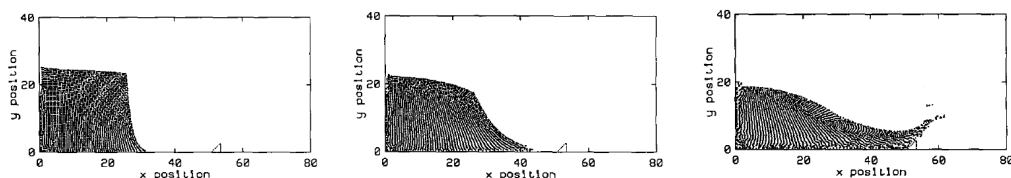


Figura 1 – Trabalho de Monaghan (1994). Simulação do problema de quebra de barragem. Imagens extraídas de Monaghan (1994).

O método MPS é oriundo de um método de partículas para escoamento de fluidos incompressíveis proposto por Koshizuka *et al.* (1995). Esse método foi capaz de simular com precisão o perfil parabólico de velocidade no escoamento de Poiseuille¹. Entretanto, a simulação do problema de quebra de barragem não apresentou resultados satisfatórios, pois as partículas próximas à superfície livre encontravam-se muito dispersas. Desta forma, Koshizuka e Oka (1996) modificaram a função peso e o modelo de incompressibilidade. Com essas mudanças, a estabilidade numérica e a velocidade computacional foram melhoradas, surgindo assim o método MPS.

O método MPS é baseado em modelos de interação entre partículas. Foram desenvolvidos os modelos para os operadores gradiente e laplaciano, além de um modelo para o tratamento de superfície livre. Além disso, Koshizuka e Oka (1996) testaram valores para o coeficiente de superfície livre e para o raio de vizinhança.

¹Escoamento laminar incompressível, completamente desenvolvido, em um tubo de seção circular constante.

A simulação do problema de quebra de barragem com o fluido se chocando contra uma parede foi realizada com sucesso. Grandes deformações e fragmentações do fluido foram verificadas, apresentando uma boa aderência com os resultados numéricos e experimentais.

No âmbito da computação gráfica, Desbrun e Gascuel (1996) foram os pioneiros na aplicação do método SPH. Neste trabalho, os autores utilizaram o método SPH para, a princípio, simular substâncias altamente deformáveis.

Morris *et al.* (1997) estenderam o método SPH para modelar escoamentos de fluidos incompressíveis com baixo número de Reynolds ($Re \leq 1$). Neste trabalho, os autores realizaram algumas modificações no formalismo básico do método SPH para minimizar os erros associados ao uso de uma equação de estado que modelava a propriedade de um fluido quase incompressível. Modificações no tratamento de viscosidade e no tratamento de fronteiras sólidas foram realizadas. Uma equação de estado para aplicação em escoamentos incompressíveis a baixo número de Reynolds foi proposta. Adicionalmente, Morris *et al.* (1997) utilizaram uma função *spline* de quinta ordem como função de suavização.

Os escoamentos de Poiseuille e Couette² foram simulados e os resultados obtidos apresentaram uma boa concordância com as soluções destes dois tipos de escoamento. Além disso, a simulação do escoamento de um fluido em torno de um cilindro circular foi realizada. Os resultados obtidos pelo método SPH foram bastante satisfatórios quando comparados aos obtidos pelo método de Elementos Finitos.

Koshizuka *et al.* (1998a) aplicaram o método MPS para a simulação de ondas sendo geradas e quebradas em uma praia. O formato das ondas geradas apresentou uma boa concordância com os resultados analíticos. Entretanto, a velocidade do escoamento próxima à parede do fundo foi menor do que a velocidade determinada pela solução analítica. Segundo os autores, esta diferença de velocidade foi causada pelo atrito das partículas de fluido com as partículas que formavam a parede de fundo. Até este momento, não havia simulação em três dimensões com o método MPS, pois o atrito artificial devido ao movimento desordenado das partículas introduzia erros na simulação. Os autores apresentaram também uma otimização para o cálculo da vizinhança que reduzia o tempo de processamento da ordem de N^2 para $N^{1.5}$, onde N é o número de partículas.

²Escoamento laminar incompressível, completamente desenvolvido, entre duas placas planas paralelas, onde a placa superior se move com velocidade horizontal constante.

Koshizuka *et al.* (1998b) apresentaram alguns tipos de simulações realizadas com sucesso pelo método MPS. Os problemas de quebra de barragem, de ondas quebrando com um objeto flutuante, de uma coluna de água se chocando contra uma parede fina deformável e o processo de fragmentação de metal líquido em explosões de vapor foram mostrados.

Muller *et al.* (2003) propuseram um método interativo baseado no método SPH para animação de fluidos em tempo interativo. Neste trabalho, os autores desenvolveram uma nova função de suavização para ser usada no cálculo da densidade das partículas. Além disso, um modelo para determinação da tensão superficial foi proposto.

Segundo os autores, os resultados obtidos não foram tão realísticos quando comparados com animações realizadas por métodos numéricos mais precisos. Entretanto, os resultados obtidos foram bastante promissores, já que a animação acontece em tempo interativo, enquanto que as animações realizadas por métodos com alto grau de precisão podem levar dias para serem realizadas.

Shao e Lo (2003) apresentaram um método SPH incompressível para simular escoamentos de fluidos Newtonianos e não-Newtonianos com a presença de superfície livre. Em sua formulação básica, o método SPH utiliza uma equação de estado para determinar a pressão do fluido e considera que o fluido é levemente compressível. No trabalho de Shao e Lo (2003), a pressão não é obtida através de uma equação de estado, mas pela solução da equação de Poisson de pressão, como no método MPS. Além disso, os autores utilizaram um procedimento similar ao usado no método MPS para determinar as partículas presentes na superfície livre. Os resultados obtidos na simulação do problema de quebra de barragem estavam de acordo com os resultados obtidos pelo método de malha VOF (*volume of fluid*).

Em Premoze *et al.* (2003), os resultados de simulações realizadas pelo método MPS foram apresentados utilizando-se recursos gráficos mais avançados. Os autores concluíram que o gargalo das simulações é a solução da equação de Poisson de pressão e sugeriram que este problema poderia ser contornado paralelizando-se a solução da equação. Além disso, concluíram que o uso de esquemas de interpolação mais sofisticados poderia melhorar a precisão dos resultados.

Tovar *et al.* (2005) aplicaram o método MPS para a simulação do fenômeno de impacto hidrodinâmico de um modelo bidimensional em forma de cunha. No

confronto visual entre o resultado da simulação e o ensaio experimental, observou-se semelhança na fragmentação do fluido bem como na deformação da superfície livre. Entretanto, foram observadas divergências nos valores de pico de pressão e na velocidade de impacto em relação aos resultados obtidos no ensaio experimental.

Tsukamoto (2006) utilizou o método MPS para simulação de corpos flutuantes em ondas altamente não-lineares. Os resultados obtidos na simulação estavam de acordo com os resultados obtidos pelo programa *Wave Analysis MIT* (WAMIT[®]). Neste trabalho, Tsukamoto desenvolveu um código paralelizado para resolver a equação de Poisson de pressão, o que proporcionou um ganho de desempenho.

Em Paiva *et al.* (2006), uma variação do método SPH foi utilizada para a simulação de derretimento de objetos. Neste trabalho, os autores simularam propriedades viscoplásticas de materiais como metais, plásticos, polímeros, entre outros. O derretimento do objeto foi modelado pela transformação de um fluido não-Newtoniano de alta viscosidade em um líquido de baixa viscosidade. Os valores de viscosidade foram determinados utilizando o modelo proposto por Mendes *et al.* (2005), onde a viscosidade é formulada através de um modelo físico de fluido Newtoniano generalizado que engloba tanto a fase viscosa quanto a fase líquida. Além disso, os autores usaram a equação de calor para modelar a fase de transição entre os estados.

Ashtiani e Farhadi (2006) utilizaram um método numérico baseado no método MPS para resolver a equação de Euler. Os autores testaram diversas funções peso para melhorar a estabilidade do método. Com base nos resultados obtidos nos testes, foi introduzida uma nova função peso que aumentou a estabilidade do método. A Figura 2 apresenta os resultados obtidos pelos pesquisadores na simulação do problema de quebra de barragem.

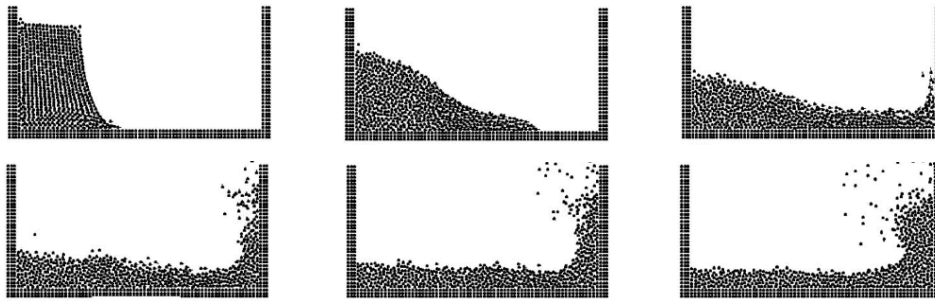


Figura 2 – Trabalho de Ashtiani e Farhadi (2006). Simulação do problema de quebra de barragem. Imagem extraída de Ashtiani e Farhadi (2006).

Shibata e Koshizuka (2007) simularam, em três dimensões, o impacto de água marítima em um *deck* utilizando o método MPS. A pressão de impacto da água no *deck* foi determinada e comparada com os resultados experimentais obtidos por um modelo bidimensional. O movimento do fluido, a elevação da superfície e a pressão de impacto da água no *deck* estavam de acordo com os resultados experimentais.

Neste trabalho, Shibata e Koshizuka verificaram a necessidade de desenvolvimento de novas técnicas para a aceleração da determinação da vizinhança, pois o modelo tridimensional era composto por 328.452 partículas. Desta forma, os autores dividiram o domínio do problema em subdomínios e reduziram o tempo de processamento para a ordem de N , onde N é o número de partículas.

Nakamura (2007) apresentou um estudo investigativo sobre a animação de fluidos utilizando o método SPH. Nakamura se baseou nos trabalhos desenvolvidos por Muller *et al.* (2003 e 2005) para realizar a simulação de fluidos em tempo interativo. Alguns problemas como o de quebra de barragem e o de descarga de água (Figura 3) foram simulados com sucesso.

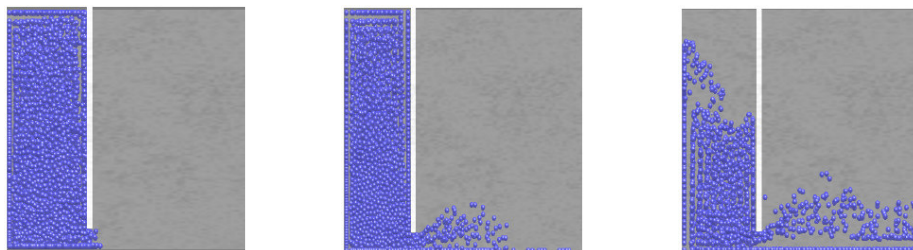


Figura 3 – Trabalho de Nakamura (2007). Simulação do problema de descarga de água. Imagens extraídas de Nakamura (2007).

Paiva (2007) propôs um método híbrido para simular fluidos multifásicos incompressíveis através do acoplamento do método SPH com o método de Diferenças Finitas. A incompressibilidade do método proposto é determinada através da equação de Poisson de pressão. Ao contrário dos métodos MPS e SPH incompressível, que calculam a pressão fazendo uma aproximação por partículas da equação de Poisson, Paiva discretizou a equação de Poisson em um *grid* fixo. Desta forma, o método proposto não depende nem da posição, nem do número de partículas, o que, segundo o autor, produz sistemas lineares menores, mais estáveis e mais eficientes.

Ashtiani *et al.* (2008) apresentaram uma formulação para o método SPH incompressível. Nesta formulação, uma nova forma do termo fonte da equação de Poisson de pressão é proposta. Além disso, uma equação de Poisson de pressão modificada é usada para satisfazer a condição de incompressibilidade das partículas de superfície. Segundo os autores, o emprego dessas modificações proporcionou uma melhora na estabilidade e na acurácia do método SPH. Os problemas de quebra de barragem e de geração de ondas foram simulados com sucesso.

1.2. Estrutura da Dissertação

Além deste capítulo introdutório, a dissertação está organizada em outros cinco capítulos. No Capítulo 2, estão apresentadas as equações que governam o movimento dos fluidos e uma breve introdução aos conceitos essenciais para a formulação dos métodos de partículas. Os Capítulos 3 e 4 apresentam as metodologias, os fundamentos básicos e os resultados obtidos dos métodos MPS e SPH, respectivamente. Os resultados obtidos são analisados e discutidos no Capítulo 5. Finalmente, no Capítulo 6, são apresentadas a conclusão e sugestões para trabalhos futuros.