

5 Implementação

Neste capítulo iremos descrever os aspectos de maior relevância na criação e implementação da biblioteca desenvolvida para simulação de fluidos. A biblioteca implementa as idéias apresentadas por Müller *et al.* [24, 26].

5.1. Estruturação da biblioteca

A biblioteca foi desenvolvida utilizando a linguagem de programação C++ e está dividida em 3 módulos (Figura 7).

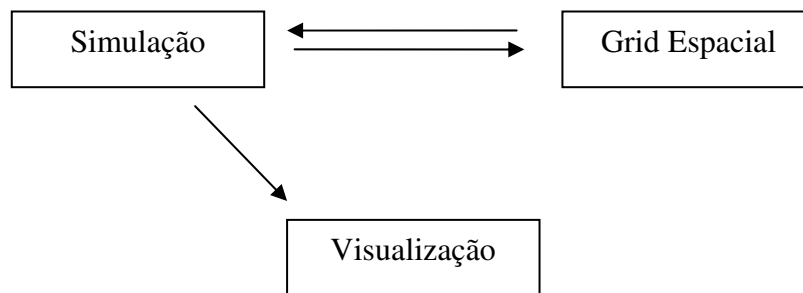


Figura 7 Estruturação da biblioteca desenvolvida.

O módulo de Simulação Física é responsável por simular e animar as entidades de um mundo físico. As entidades do mundo físico podem ser uma única partícula ou um sistema de partículas (várias partículas). A biblioteca, através de um método numérico (Euler, Leap Frog [7]), calcula a nova posição da entidade no tempo $t_0 + \Delta t$ devido à ação dos agentes (forças aplicadas) sobre as entidades.

Após o cálculo das novas posições das entidades, verifica-se a validade dessas novas posições (ausência de colisão com obstáculos). Caso a entidade esteja numa posição inválida, traz-se a entidade para uma posição válida.

O módulo de Grid Espacial é responsável por determinar as vizinhanças das partículas. A simulação de fluidos descrita neste trabalho é baseada em

sistemas de partículas e essas partículas interagem umas com as outras. A maneira mais trivial de descobrir quais partículas estão interagindo, é fazer uma busca quadrática ($O(n^2)$) entre todas as partículas dentro do sistema. Essa solução não é adequada uma vez que estamos buscando simulações a taxas interativas. Com o método SPH, funções de suavização possuem um domínio de influência finito, ou seja, apenas uma fração das partículas estarão interagindo com uma dada partícula.

Uma maneira de evitar a busca quadrática entre as partículas é aplicar um método de subdivisão espacial capaz de diminuir a complexidade do problema de busca. Neste trabalho optou-se pelo o uso da estrutura espacial de Grade Regular (*grid*) [9]. Outras estruturas espaciais existem e também são usadas para resolver o problema de busca [9].

O uso do *grid* para resolver o problema de busca diminui a complexidade do problema. Com o uso do *grid* a ordem do problema deixa de ser quadrática $O(n^2)$ e passa a ser $O(mn)$ onde m é o número médio de partículas dentro das células vizinhas à célula que contém a partícula de interesse. Um dos fatores que determina a eficiência da estrutura de *grid* é o tamanho das células. Para o problema de busca na simulação de fluidos, o tamanho para as células é escolhido de forma que seja igual ao tamanho do raio de influência das funções de suavização (assumindo que a área de influência de todas as funções de suavização seja a mesma).

Com a subdivisão em células, dado que a partícula de interesse encontra-se na célula $\{i,j,k\}$ (estamos considerando o caso 3D), para saber quais partículas estão interagindo com a partícula de interesse, basta testar as partículas presentes nas células adjacentes nas 3 dimensões. No caso de um *grid* 2D, temos 9 células para fazer a busca e no caso 3D temos 27 células. A Figura 8 exemplifica a busca no caso de um *grid* em 2D.

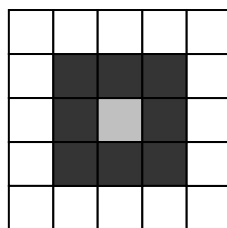


Figura 8 A célula cinza clara possui a partícula de interesse. A busca para determinar quais partículas estarão interagindo com a partícula de interesse será feita na própria célula e nas células em cinza escuro.

O módulo de visualização é responsável pela renderização dos resultados da simulação. Este módulo utiliza a API gráfica OpenGL e uma estrutura de grafo de cena [6]. Duas formas para visualização dos fluidos foram desenvolvidas. Podemos visualizar as partículas do fluido como esferas ou pontos. Outra forma de visualizar a simulação de fluidos é através do algoritmo Marching Cubes [19], não implementado neste trabalho. O algoritmo Marching Cubes extrai uma iso superfície do fluido e a desenha como uma malha de triângulos.

5.2. Evolução do Sistema

A simulação de fluidos implementada pode ser descrita em 5 passos. Destacaremos os pontos mais importantes de cada passo. A Tabela 1 enumera os atributos associados às partículas do fluido.

Posição (\vec{x})
Velocidade (\vec{v})
Massa (m)
Massa específica (ρ)
Pressão (P)
Cs
Normal (\vec{n})
Lista de partículas vizinhas
Coeficiente de Viscosidade (μ)
Massa específica de Repouso (ρ_0)
Constante de Gás (k)

Tabela 1 Os principais atributos das partículas de um fluido presentes neste trabalho. Os últimos 3 atributos são necessários para o caso de interação entre fluidos (Seção 4.1.6).

1º passo: Preenchimento da estrutura de grid.

No início de cada quadro, a estrutura de *grid* é limpa e preenchida com as novas posições das partículas. Após o preenchimento do *grid*, a lista de vizinhança de cada partícula é atualizada.

2º passo: Cálculo da Massa específica.

A massa específica das partículas é essencial na formulação do método SPH. O cálculo da massa específica das partículas é feito após o preenchimento da lista de vizinhança das partículas. Para o cálculo da massa específica é usada a Equação 4.7. Após o cálculo da massa específica, é calculada a pressão de cada partícula através da Equação 4.11.

3º passo: Cálculo do valor de Cs e da normal de superfície

Neste passo é calculado e armazenado o valor do campo de cor da partícula (Cs), assim como a normal da superfície (gradiente de Cs) e o divergente de Cs (Laplaciano de Cs). Esses valores são armazenados para mais adiante serem utilizados no cálculo da tensão superficial do fluido. Além disso, com o valor da normal de superfície de cada partícula, é possível identificar as partículas que compõem a superfície do fluido. A identificação das partículas que compõem a superfície do fluido é útil tanto para o efeito de visualização (em casos que haja a extração da iso superfície) quanto para a colisão contra obstáculos.

4º passo: Aplicação das Forças

Aplicam-se todos os agentes (gradiente de pressão, força de viscosidade, forças externas) presentes na Equação de Navier-Stokes sobre as partículas do fluido, guardando a força total exercida sobre cada partícula do fluido.

5º passo: Evolução

Com a força resultante em cada partícula calculada no passo anterior, obtemos as acelerações (Equação 4.5) e conseqüentemente, as novas posições das partículas. Para fazer a evolução do sistema o método numérico Leap Frog foi utilizado. Testes de colisão contra obstáculos são executados e são aplicadas as correções para evitar que as partículas estejam em colisão contra os obstáculos.

Após o cálculo das novas posições das partículas, as novas posições são enviadas para o módulo responsável pela visualização.

5.3. Discussão

Neste trabalho a implementação da tensão superficial apresentada por Müller *et al.*[24] apresentou problema. Na teoria, o valor do vetor normal à superfície do fluido $|\vec{n}|$ é diferente de zero apenas na superfície do fluido. Por isso, os autores sugerem que somente deve ser calculada e aplicada a tensão superficial às partículas que tiverem $|\vec{n}|$ maior que um limiar, já que o cálculo de $\frac{\vec{n}}{|\vec{n}|}$ onde $|\vec{n}|$ é próximo de zero, pode causar problemas de precisão numérica. O resultado obtido na implementação da biblioteca, demonstrou que o valor deste limiar não pode ser muito próximo de zero.

Foi feito um teste em que um fluido representando água, com 8000 partículas e massa específica de repouso de 1000 kg/m^3 encheria uma caixa em forma de cubo. As dimensões da caixa vão de **-0.12 a 0.12** nos três eixos X,Y e Z. Foi esperado que o fluido chegasse ao repouso para amostrar alguns valores das normas dos vetores normais à superfície e alguns valores de Cs. Os valores foram amostrados ao longo de uma linha reta traçada cruzando o meio da caixa. A Figura 9 ilustra o teste feito.

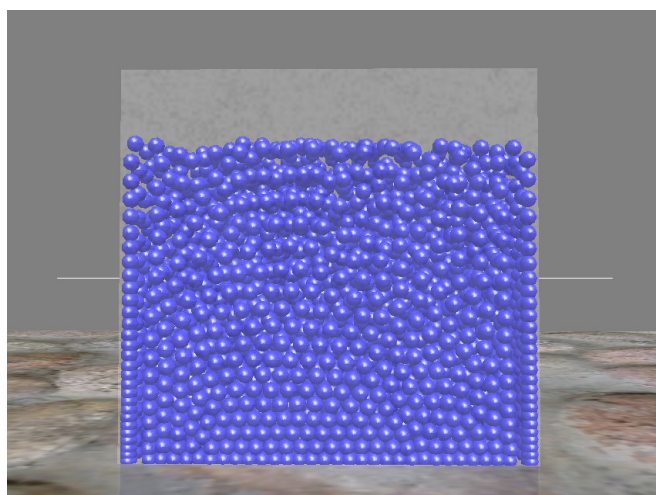


Figura 9 Uma caixa enchida com um fluido representado por 8000 partículas. A linha reta (em branco) foi utilizada para a amostragem dos valores da norma do vetor normal à superfície e de Cs.

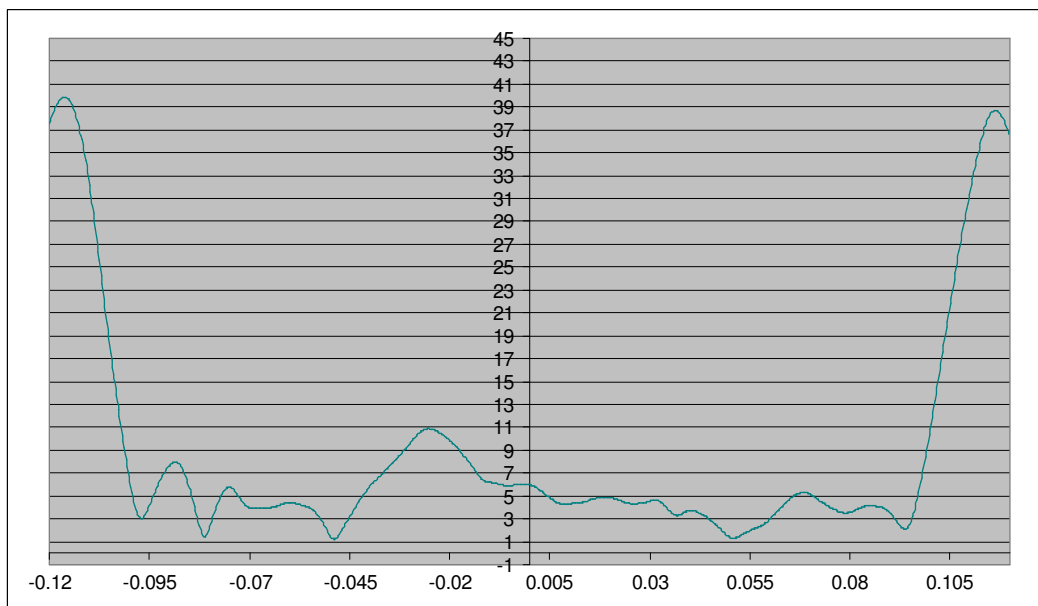


Figura 10 O gráfico com os valores da norma do vetor normal à superfície amostrados em diferentes pontos do fluido. O eixo das abscissas do gráfico representa o eixo X.

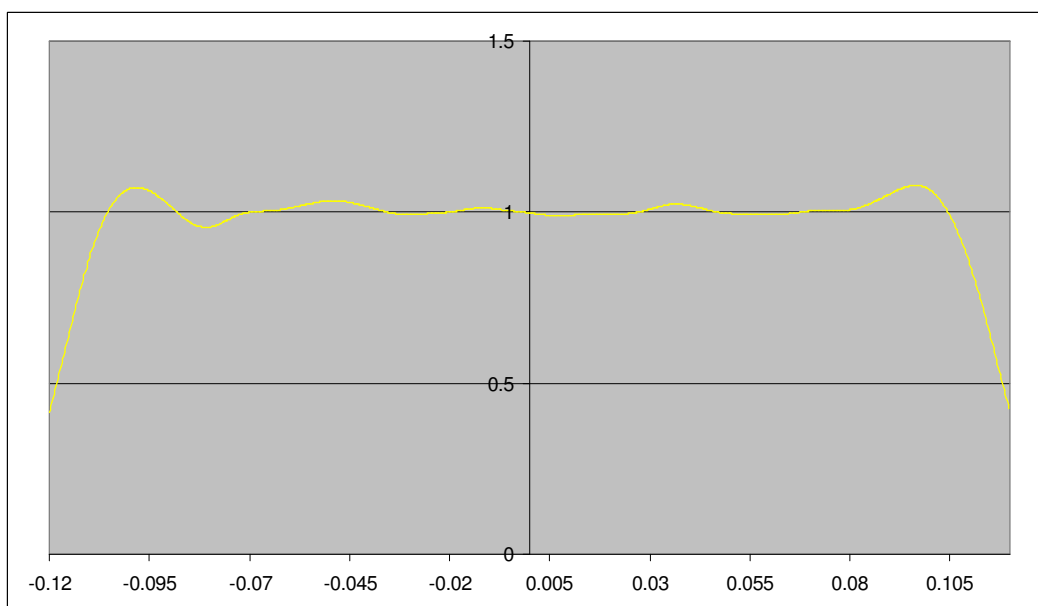


Figura 11 O gráfico com os valores do campo de cor (C_s) amostrados em diferentes pontos do fluido. O eixo das abscissas do gráfico representa o eixo X.

A Figura 10 apresenta o gráfico com os valores das normas dos vetores normais à superfície das amostras feitas em diferentes posições do fluido sobre a linha traçada. A Figura 11 apresenta os valores do campo de cor (C_s) das amostras feitas em diferentes posições do fluido sobre a linha traçada. Através do gráfico da Figura 10, vemos que no interior do fluido a norma dos vetores normal à superfície é diferente de zero e que através do gráfico da Figura 11 os valores do

campo de cor oscilam próximos de 1. Esse fato ocorre devido a problemas de amostragem na aplicação do método SPH. Se fosse possível conseguir uma enorme quantidade de amostras ao se determinar o campo de cor das partículas, os valores amostrados seriam muito próximos do valor esperado 1 e conseqüentemente a norma do vetor normal à superfície do fluido dado pelo gradiente do campo de cor seria bem próxima de zero.

Na prática, uma quantidade muito grande de amostra compromete a eficiência do método SPH em relação ao seu custo computacional, tornando inviável em certos tipos de aplicações. Na biblioteca desenvolvida usamos como limiar de $|\vec{n}|$ para determinar se uma partícula pertence à superfície do fluido o valor 10.0. Este valor foi obtido através de alguns experimentos mudando os parâmetros de configuração de amostragem, como quantidade de partículas totais e raio de suporte das funções de suavização.