



## MODELAGEM DO ESCOAMENTO TRIDIMENSIONAL DO CONCRETO FRESCO UTILIZANDO O MÉTODO MOVING PARTICLE SEMI-IMPLICIT

**Fabio Kenji Motezuki**

fmote@usp.br

Depto. de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo  
Av. Prof. Almeida Prado, trav. 2, 83, Cidade Universitária, 05508-900, São Paulo, SP, Brasil

**Gabriel Henrique de Souza Ribeiro**

g.ribeiro@usp.br

Depto. de Engenharia Naval e Oceânica, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo  
Av. Prof. Mello Moraes, 2231, Cidade Universitária, 05508-970, São Paulo, SP, Brasil

**Fernando Akira Kurokawa**

**Liang-Yee Cheng**

fernando.kurokawa@poli.usp.br

cheng.yee@poli.usp.br

Depto. de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo  
Av. Prof. Almeida Prado, trav. 2, 83, Cidade Universitária, 05508-900, São Paulo, SP, Brasil

**Resumo.** A simulação numérica de fluídos não newtonianos é recorrente em aplicações da engenharia, sendo um exemplo da construção civil o escoamento de concreto fresco na etapa de preenchimento das formas. Neste trabalho investiga-se o comportamento do concreto, que por simplicidade foi considerado um fluido não newtoniano homogêneo. Utiliza-se uma abordagem baseada no método Moving Particle Semi-Implicit (MPS) que é um método lagrangeano que discretiza o espaço por meio de partículas com aplicação em escoamentos com geometrias complexas, grandes deformações, fragmentações e junção de superfícies livres. Neste método as equações governantes de meios contínuos são resolvidas substituindo os operadores diferenciais por operadores algébricos derivados, baseado num modelo de interação entre partículas. Para a modelagem do termo viscoso foram utilizados modelos constitutivos relacionando a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação. Casos de validação de dam-break com Carbopol 940 são estudados, assim como um teste de slump. Os resultados das simulações são comparados com resultados experimentais, analíticos e numéricos encontrados na literatura.

**Palavras-chave:** Fluido não newtoniano, Simulação computacional, Moving Particle Semi-Implicit, Dam-break, Slump

## 1 INTRODUÇÃO

A simulação numérica de fluidos não newtonianos é recorrente em aplicações da engenharia, sendo um exemplo na construção civil, o escoamento de concreto fresco na etapa de preenchimento das formas.

O concreto tem uma grande importância devido a características como alta durabilidade e alta resistência mecânica, principalmente quando associado ao aço. Porém devido ao comportamento não newtoniano do concreto fresco e da complexidade geométricas das formas e armaduras, o lançamento não garante que toda forma seja ocupada. Como a massa rígida é responsável pela resistência mecânica da peça, a ocorrência de vazios pode ser determinante para o colapso da estrutura. Além disto, vazios próximos às armaduras podem favorecer a corrosão do aço, além de que quando endurecido a única maneira de corrigir são juntas frias, que reduzem a resistência da peça.

Dentro da tecnologia da construção civil, existem ensaios experimentais que fornecem medidas utilizadas como critério de aceitação do concreto recebido. Por exemplo, o critério para aceitar o concreto em caminhões betoneiras é feita através do abatimento de um tronco de cone com medidas padronizadas (cone de Abrams), no ensaio conhecido como *slump test*. Outro ensaio muito utilizado é a caixa L (*L-box*), para avaliar a aceitação de concretos auto-adensáveis (*Self Compacting Concretes – SCC*).

De modo a melhorar a trabalhabilidade do material (Ferraris et al., 1998; Paiovici, 2002; Castro, 2007; Cremonesi et al., 2010), grandes esforços vem sendo despendidos com a finalidade de se verificar as propriedades do concreto fresco do ponto de vista da reologia. A maneira mais comum de avaliar a trabalhabilidade é utilizando o ensaio do abatimento de tronco de cone. O *slump test* é o objeto de estudo mais detalhado em Ferraris e De Larrard (1998), na qual é apresentada uma correlação entre tensão de escoamento, densidade do concreto e valor do abatimento após 1 minuto.

De Larrard et al. (1998) analisaram as características reológicas do concreto fresco em um reômetro de placas planas e constataram que o concreto é bem descrito pelo modelo reológico de Herschel-Bulkley. No entanto, devido a uma boa aproximação principalmente em casos em que a tensão de escoamento é mais alta, o modelo reológico Bingham é o mais frequentemente utilizado nos estudos do concreto fresco (Ferraris et al., 1998; Paiovici, 2002; Cremonesi et al., 2010).

Devido a não linearidade entre tensão e taxa de deformação (viscosidade aparente é variável com a taxa de deformação), a análise do comportamento do fluido é difícil. Além disso, os ensaios experimentais possuem um alto custo. Isso torna favorável o uso de métodos numéricos para sua simulação, principalmente em grandes deformações e geometrias complexas. Os métodos baseados em partículas vêm sendo bastante utilizados para esses tipos de problemas. Pelo fato do domínio ser discretizado em partículas lagrangeanas, favorece o estudo de fenômenos envolvendo escoamento com superfícies livres.

Destacam-se alguns trabalhos baseados em partículas, como Mechtcherine et al (2009) que aplicam o método *Discrete Element Method* (DEM) no escoamento de concreto auto-adensável em problemas como o *slump test*, Caixa L e *J-Ring*. Pereira et al. (2013) investigaram o comportamento dos fluidos não newtonianos em problemas bidimensionais

utilizando um simulador baseado no método *Moving Particle Semi-implicit* (MPS). Os casos investigados foram o problema da ruptura da barragem, conhecido como dam break, com o composto Carbopol 940 (Leite, 2009) e o escoamento do concreto auto-adensável na Caixa L.

Visando dar continuidade ao trabalho de Pereira et al. (2013), o objetivo deste trabalho é simular escoamento tridimensional de fluidos não newtonianos, em particular o concreto fresco, utilizando o método MPS. A validação da abordagem numérica é feita no problema dam break 3D com o composto Carbopol 940, comparando os resultados numéricos e experimentais apresentados por Leite (2009). Além disso, foi simulado o problema *slump test* no caso 3D, comparando os resultados obtidos com o MPS com os resultados numéricos de Cremonesi et al. (2010).

## 2 METODOLOGIA

Neste trabalho foram adotadas hipóteses simplificadoras que, apesar de tornarem os cálculos mais viáveis, não afetam significativamente os resultados. A primeira delas é assumir que o concreto fresco e o Carbopol 940 são fluidos não newtonianos homogêneos. Com isso, suas propriedades reológicas são iguais ao longo de toda sua extensão.

As simulações numéricas foram realizadas em um código baseado no método *Moving Particle Semi-implicit* (MPS) proposto por Koshizuka & Oka (1996). O método consiste em dividir o domínio do fluido em partículas e utiliza a descrição lagrangeana para formular as equações governantes de meios contínuos. Sendo um método sem malha, o MPS é apropriado para os problemas que envolvem grande deformação da superfície livre, fragmentação e fusão, escoamentos multifásicos e multifísica.

O simulador MPS programado em C++, foi implementado e aperfeiçoado no laboratório Tanque de Provas Numérico da USP. As simulações foram executadas em um computador com oito núcleos Intel Xeon X5560 com *clock* de 2.8GHz e 24Gb de memória RAM.

### 2.1 Equações governantes

As equações governantes que modelam escoamentos incompressíveis, transientes e isotérmicos são as equações de conservação de massa e de momento, que na descrição lagrangeana são dadas respectivamente por:

$$\frac{D\rho}{Dt} = \rho(\nabla \cdot \vec{u}) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{D\vec{u}}{Dt} = \frac{1}{\rho}(-\nabla P + \nabla \cdot \mathbb{T}) + \vec{f}, \quad (2)$$

em que  $\vec{u}$  é o vetor velocidade,  $t$  é o tempo,  $\rho$  é a densidade,  $P$  é a pressão,  $\mathbb{T}$  é o tensor das tensões viscosas e  $\vec{f}$  representa as forças externas.

### 2.2 Modelo reológico

Neste trabalho, para investigar o comportamento de fluidos não newtonianos, foram utilizados dois modelos reológicos, Herschel-Bulkley e Bingham. No modelo de Herschel-Bulkley, a viscosidade aparente é descrita como:

$$\eta = \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}} + K\dot{\gamma}^{n-1}, \quad (3)$$

em que  $\tau_0$  é a tensão limite de escoamento,  $K$  é o índice de consistência,  $n$  é o índice Power-Law e  $\dot{\gamma}$  é a taxa de deformação, calculada por:

$$\dot{\gamma} = \sqrt{2(\mathbb{D}:\mathbb{D})}. \quad (4)$$

E, no modelo de Bingham, a viscosidade aparente é descrita como,

$$\eta = \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}} + \mu_p, \quad (5)$$

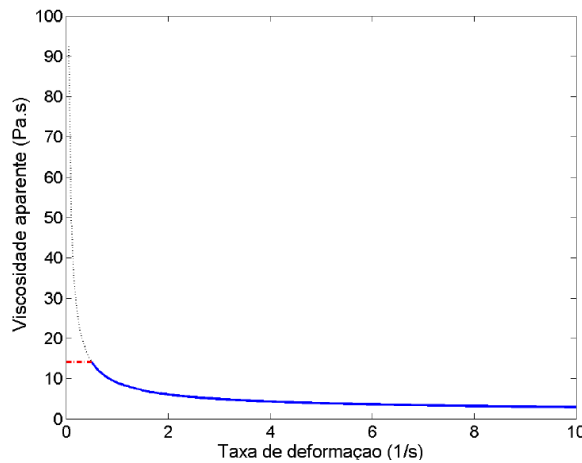
na qual  $\mu_p$  é a viscosidade plástica.

Observa-se pelas Eq. (3) e Eq. (5) que existe uma singularidade, quando os valores de taxa de deformação tendem a zero a viscosidade aparente tende ao infinito. Para contornar este problema a viscosidade aparente, para taxas de deformação abaixo de um  $\dot{\gamma}_{cr}$ , foi limitada a um valor máximo, ou seja:

$$\tilde{\eta} = \begin{cases} \eta(\dot{\gamma}_{cr}) & \text{se } \dot{\gamma} \leq \dot{\gamma}_{cr} \\ \eta(\dot{\gamma}) & \text{se } \dot{\gamma} > \dot{\gamma}_{cr} \end{cases}, \quad (6)$$

em que  $\tilde{\eta}$  é a viscosidade aparente utilizada no cálculo do divergente das tensões Eq. (11) e  $\eta(\dot{\gamma})$  é a viscosidade aparente calculada utilizando um dos modelo reológico apresentados nas Eq. (3) ou Eq. (5).

Um exemplo do comportamento da viscosidade aparente em função da taxa de deformação para o caso de um fluido Herschel-Bulkley é apresentado na Fig. 1.



**Figura 1. Viscosidade aparente em função da taxa de deformação, com destaque para a aproximação realizada a baixas taxas de deformação**

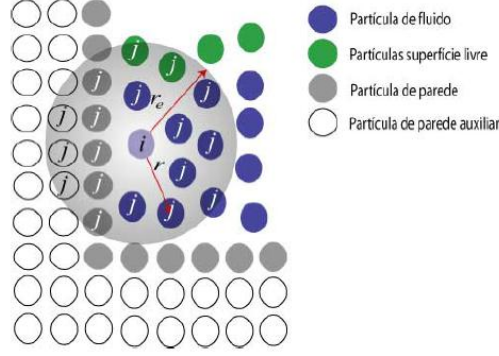
O valor máximo de  $\tilde{\eta}$  deve ser cuidadosamente escolhido, pois um valor muito baixo não reproduzirá o comportamento de um fluido não newtoniano a baixas deformações e um valor muito alto pode ocasionar instabilidade numérica.

## 2.3 Método numérico

No MPS, para a solução numérico-computacional das Eq. (1) e Eq. (2) levando em conta as condições iniciais e de contorno, os operadores diferenciais dessas equações são substituídos por operadores numéricos derivados de um modelo de interação entre partículas, onde para uma dada partícula  $i$ , a influência das partículas vizinhas  $j$  é dada pela seguinte função peso:

$$w(|\vec{r}_j - \vec{r}_i|, r_e) = \begin{cases} \frac{r_e}{|\vec{r}_j - \vec{r}_i|}, \\ 0 \end{cases} \quad (7)$$

na qual  $|\vec{r}_j - \vec{r}_i|$  é a distância entre as partículas  $i$  e  $j$ ,  $r_e$  é o raio efetivo dentro do qual as partículas vizinhas  $j$  exercem influência sobre a partícula  $i$ . Neste trabalho o valor utilizado para  $r_e$  é 2,1 vezes a distância entre partículas inicial. A Fig. 2 ilustra a partícula  $i$  e as partículas  $j$  consideradas no cálculo do modelo de interação.



**Figura 2. Representação bidimensional do modelo interação entre partículas para uma partícula  $i$  e suas vizinhas  $j$  (Tsukamoto, 2006)**

Com base no modelo de interação entre partículas, os operadores gradiente e laplaciano para uma função escalar  $\phi$  e o divergente de uma função vetorial  $\vec{\phi}$  são calculados de acordo com as Eq. (8), Eq. (9) e Eq. (10), respectivamente:

$$\nabla \phi_i = \frac{d}{pnd^0} \sum_{j \neq i} \frac{(\phi_j - \phi_i)}{|\vec{r}_j - \vec{r}_i|^2} (\vec{r}_j - \vec{r}_i) w(|\vec{r}_j - \vec{r}_i|, r_e), \quad (8)$$

$$\nabla^2 \phi_i = \frac{2d}{pnd^0 \lambda} \sum_{j \neq i} (\phi_j - \phi_i) w(|\vec{r}_j - \vec{r}_i|, r_e), \quad (9)$$

$$\nabla \vec{\phi}_i = \frac{d}{pnd^0} \sum_{j \neq i} \frac{(\vec{\phi}_j - \vec{\phi}_i) \cdot (\vec{r}_j - \vec{r}_i)}{|\vec{r}_j - \vec{r}_i|^2} w(|\vec{r}_j - \vec{r}_i|, r_e), \quad (10)$$

em que  $d$  é o número de dimensões da simulação e  $pnd^0$  é a densidade de número de partículas no arranjo inicial reticulado. A densidade de número de partículas de uma determinada partícula  $i$  é dada pela Eq. (11) e o parâmetro  $\lambda$  é dado pela Eq. (12):

$$pnd_i = \sum_{j \neq i} w(|\vec{r}_j - \vec{r}_i|, r_e), \quad (11)$$

$$\lambda = \frac{\sum_{j \neq i} |\vec{r}_j - \vec{r}_i|^2 w(|\vec{r}_j - \vec{r}_i|, r_e)}{\sum_{j \neq i} w(|\vec{r}_j - \vec{r}_i|, r_e)}. \quad (12)$$

Como o valor do  $pnd$  é proporcional à quantidade de partículas dentro do raio efetivo, é também proporcional à densidade do fluido. Sendo assim, a condição de incompressibilidade do escoamento é garantida mantendo o valor de  $pnd$  constante e igual ao valor inicial  $pnd^0$ .

O algoritmo do MPS é dividido em duas etapas. Na primeira etapa, as velocidades, posições e densidade de número das partículas de fluido são estimadas explicitamente usando a equação de conservação de quantidade de movimento Eq. (2), desprezando-se o termo do gradiente de pressão.

Com a velocidade e posição estimadas na primeira etapa passa-se para a etapa seguinte na qual se calcula o  $pnd^*$  e, por meio de um sistema linear de equações de Poisson de pressão, Eq. (13), obtêm-se a pressão nas partículas de maneira implícita.

$$\nabla^2 P_i^{n+1} = \frac{1}{\Delta t^2} \frac{pnd_i^* - pnd^0}{pnd^0}. \quad (13)$$

Com as pressões resultantes do sistema linear pode-se calcular  $u'$ , a correção para a velocidade das partículas devido ao termo de pressão por meio da Eq. (14), e com as velocidades corrigidas podem-se atualizar as posições das partículas.

$$u' = -\frac{\Delta t}{\rho} \nabla P_i^{n+1}. \quad (14)$$

O termo viscoso na equação de conservação da quantidade de movimento é representado pelo divergente do tensor das tensões viscosas,  $\nabla \cdot \mathbb{T}$ . O tensor das tensões viscosas é dado por

$$\nabla \cdot \mathbb{T} = 2\mathbb{D} \cdot \nabla \eta + \eta \nabla^2 \vec{u}, \quad (15)$$

na qual  $\eta$  é a viscosidade aparente e  $\mathbb{D}$  é o tensor das taxas de deformações, sendo calculado por:

$$\mathbb{D} = \frac{1}{2} [(\nabla \vec{u}) + (\nabla \vec{u})^T], \quad (16)$$

### 2.3.1 Condição de contorno de parede

Para a modelagem das paredes, considerando  $r_e = 2,1l_o$ , foram utilizadas três camadas de partículas (Figura 3), sendo uma camada de partículas de parede e duas camadas de partículas *dummy*, cuja função é complementar a vizinhança das partículas de parede e de fluido próximas da parede e assim garantir o cálculo correto da pressão.

Caso um raio efetivo maior seja utilizado, a quantidade de camadas de partículas *dummy* deve ser ajustada de modo que a vizinhança da partícula de parede esteja sempre completa.

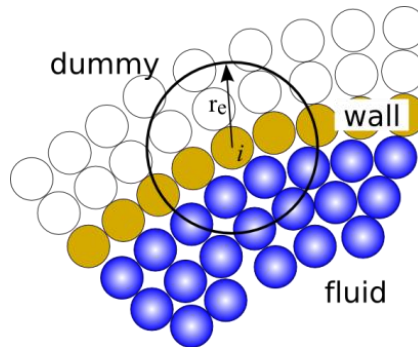


Figura 3. Disposição das partículas *dummy*, parede e fluido

No caso da modelagem de paredes *no-slip* para o escoamento de fluidos não newtonianos, é utilizado o espelhamento da velocidade das partículas de fluido. Para isso é feita uma extrapolação para as partículas *dummy* correspondentes de modo a garantir o correto cálculo das taxas de deformação nas partículas próximas da parede.

O cálculo da velocidade nas partículas *dummy* pode ser dividido em duas etapas, a primeira é a determinação da posição da partícula *dummy* espelhada, a segunda é o cálculo da velocidade na partícula *dummy* espelhada utilizando uma média ponderada da velocidade das partículas de fluido e o cálculo da velocidade da partícula *dummy*.

### 2.3.2 Condição de contorno de superfície livre

Foi utilizado o método de detecção proposto por Lee et al. (2011), onde para que uma partícula seja da superfície livre duas condições devem ser satisfeitas:

$$\begin{cases} pnd_i < \beta_1 pnd^0 \\ N_i < \beta_2 N^0 \end{cases}, \quad (17)$$

em que  $N_i$  é o número de partículas vizinhas e  $N^0$  é o número de partículas vizinhas de uma partícula totalmente submersa e na configuração inicial. Os coeficientes  $\beta_1$  e  $\beta_2$  foram avaliados, respectivamente, como 0,97 e 0,85 (Lee et al., 2011).

Às partículas que satisfaçam a ambas as condições dadas pela Eq. (17), a pressão é imposta como zero (pressão atmosférica), de modo que seja atendida a condição dinâmica de superfície livre.

### 3 RESULTADOS

#### 3.1 Dam Break 3D

O teste de *Dam-break* se caracteriza pelo colapso de um bloco de fluido de dimensões bem conhecidas, podendo avaliar o avanço da frente de onda e a taxa de decaimento da coluna ao longo do tempo. Leite (2009) estudou esse problema para o caso de fluidos não-newtonianos, em específico para o Carbopol 940, um polímero poli acrílico, realizando ensaios experimentais e análises numéricas para o problema. Posteriormente, Pereira et al. (2013) estudou o mesmo problema por meio de simulações em 2D no simulador MPS. No presente trabalho, a validação dos resultados numéricos é feita para este problema, mas agora para o caso tridimensional.

A geometria deste problema segue a mesma do aparato experimental usado por Leite (2009), ilustrado na Figura 4. Foi considerada um bloco de fluido (Carbopol 940) de comprimento 50cm, largura de 32cm e com três diferentes alturas ( $h$ ): 8cm, 10cm e 12cm, inicialmente em equilíbrio hidrostático confinada entre paredes fixas. No instante  $t = 0.0s$  a parede da direita é removida instantaneamente e, sob a ação da gravidade, o bloco do fluido sofre o colapso deslizando na direção horizontal. Neste caso foi utilizado o modelo reológico de Herschel-Bulkley.

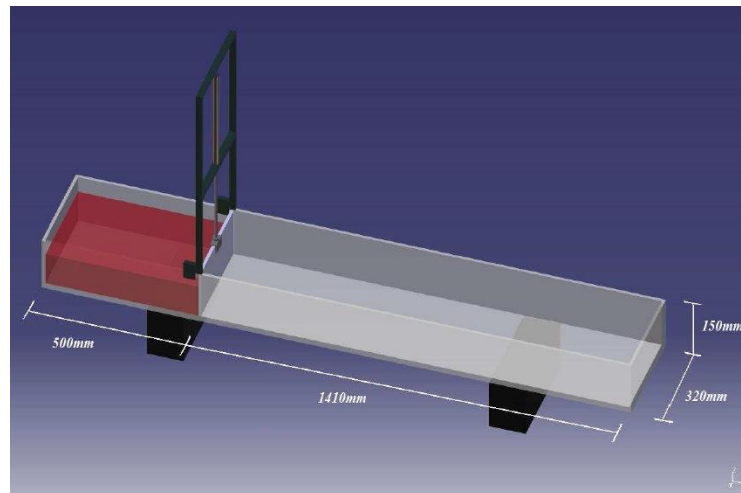


Figura 4. Dimensões da geometria do problema dam break (Fonte: Leite (2009))

Os parâmetros reológicos utilizados para esta simulação foram os mesmos obtidos por Leite (2009), que estão apresentados na Tabela 1.

**Tabela 1. Propriedades do fluido simulado Leite (2009)**

| $\tau_0[Pa]$ | $K[Pa \cdot s^n]$ | $n$    | $\rho[kg/m^3]$ |
|--------------|-------------------|--------|----------------|
| 4.4715       | 1.1849            | 0.5497 | 1200           |

A convergência do modelo numérico foi estudada utilizando-se três diferentes resoluções  $L/dp = 50, 100$  e  $125$ , onde  $L$  é o comprimento do bloco de fluido (50cm) e  $dp$  a distância entre partículas do modelo (10mm, 5mm e 4mm). A Tabela 2 mostra a quantidade de partículas geradas para cada altura do bloco de fluido ( $h$ ). Além disso, o *time step* utilizado nas simulações foi de 0.0001s.

**Tabela 2. Quantidade de partículas dos modelos**

| Resolução ( $L/dp$ ) | Quantidade de partículas |            |            |
|----------------------|--------------------------|------------|------------|
|                      | $h = 8cm$                | $h = 10cm$ | $h = 12cm$ |
| 50                   | 54586                    | 57686      | 60786      |
| 100                  | 261909                   | 287109     | 312309     |
| 125                  | 1442191                  | 1645391    | 184859     |

O tempo de processamento para cada caso, em um tempo de simulação de 0.4 segundos, está apresentado na Tabela 3.

**Tabela 3. Tempo de processamento dos modelos**

| Resolução ( $L/dp$ ) | Tempo de processamento (min) |            |            |
|----------------------|------------------------------|------------|------------|
|                      | $h = 8cm$                    | $h = 10cm$ | $h = 12cm$ |
| 50                   | 18                           | 110        | 862        |
| 100                  | 20                           | 122        | 1030       |
| 125                  | 21                           | 138        | 1219       |

Nas Figs. 5, 6 e 7 são apresentados os resultados do estudo de convergência através da comparação dos resultados das simulações 3D com o MPS e os resultados experimentais e numéricos de Leite (2009) no instante  $t = 0.4s$ , e para as três diferentes alturas de fluido. Para as comparações, os resultados numéricos 3D obtidos com o MPS foram computados a partir do corte do plano  $xz$  na posição  $y = 16cm$ .

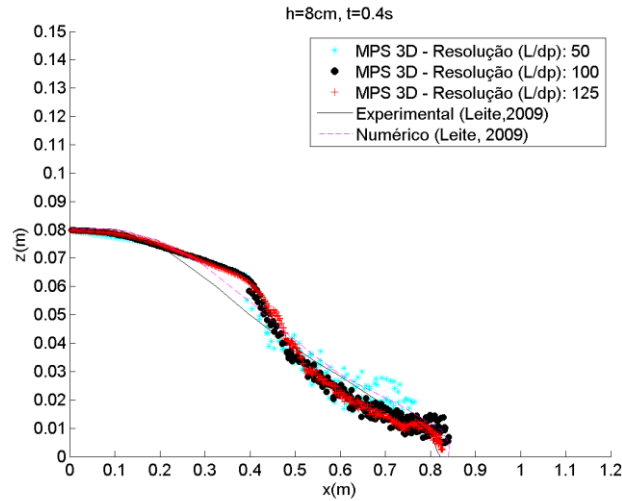


Figura 5. Comparação entre os resultados numéricos 3D obtidos pelo MPS e os resultados experimental e numérico de Leite (2009) para frente de onda no instante  $t = 0.4s$  e para  $h = 8cm$

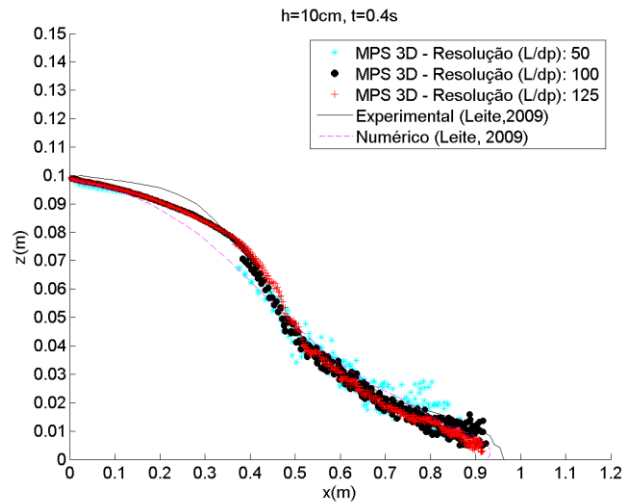


Figura 6. Comparação entre os resultados numéricos 3D obtidos pelo MPS e os resultados experimental e numérico de Leite (2009) para frente de onda no instante  $t = 0.4s$  e para  $h = 10cm$

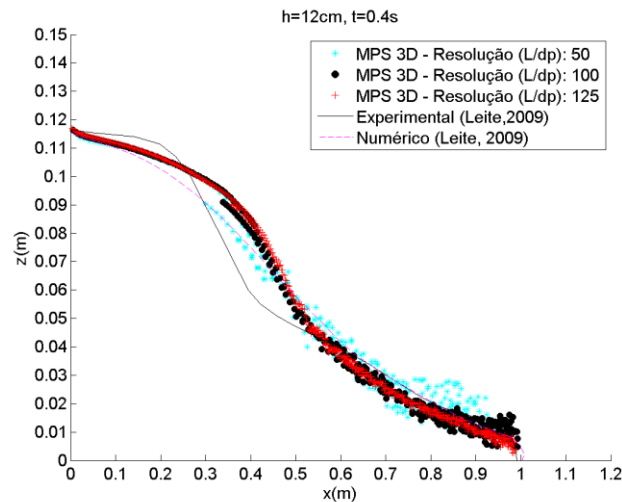
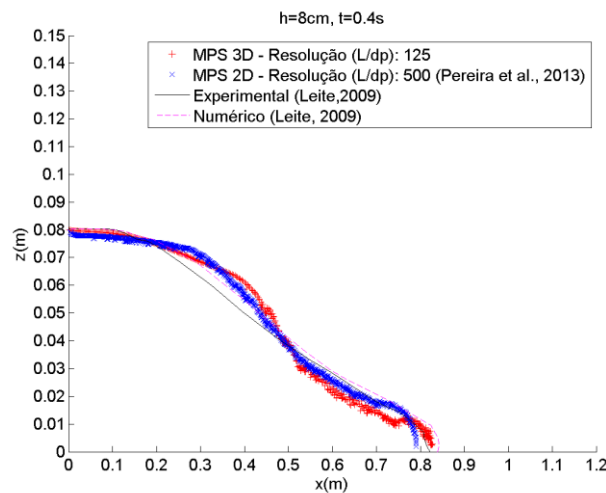


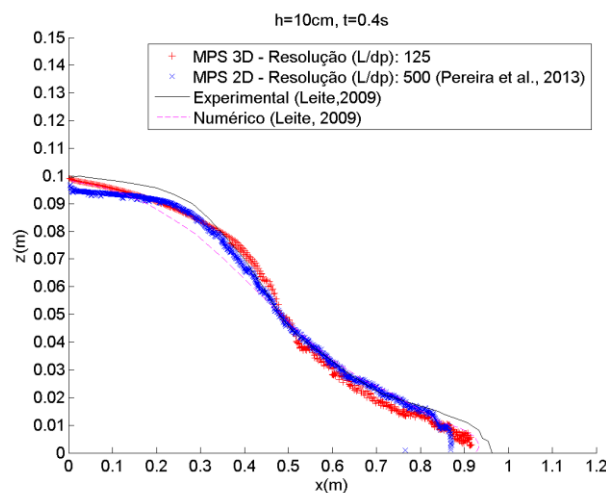
Figura 7. Comparação entre os resultados numéricos 3D obtidos pelo MPS e os resultados experimental e numérico de Leite (2009) para frente de onda no instante  $t = 0.4s$  e para  $h = 12cm$

Pode-se observar a partir dessas figuras que os resultados numéricos obtidos com MPS estão em boa concordância com os resultados experimentais e numéricos de Leite (2009). É possível observar ainda que, para a resolução de  $L/dp=50$ , existe uma oscilação da superfície livre que é reduzida na resolução de  $L/dp=100$  e praticamente não aparece na resolução de  $L/dp=125$ , demonstrando um melhor comportamento da superfície livre do fluido com o aumento da resolução.

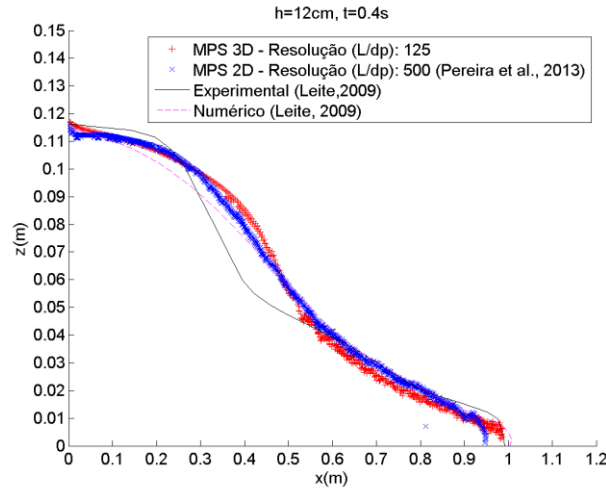
Já as Figs. 8, 9 e 10 mostram a comparação entre os resultados numéricos 3D, na resolução  $L/dp=125$ , os resultados numéricos 2D de Pereira et al (2013), na resolução  $L/dp=500$ , e os resultados experimentais e numéricos de Leite (2009), no instante  $t = 0.4s$ , respectivamente, para as alturas 8cm, 10cm e 12 cm. Vale ressaltar que os resultados numéricos 2D de Pereira et al. (2013) também foram obtidos através do método MPS em três diferentes resoluções de partículas. Na comparação utilizou-se a resolução mais alta.



**Figura 8. Comparativo entre os resultados numéricos 3D, resultados numéricos 2D de Pereira et al. (2013) e os dados experimental e numérico de Leite (2009) no instante  $t = 0.4s$  e para  $h = 8\text{cm}$**



**Figura 9. Comparativo entre os resultados numéricos 3D, resultados numéricos 2D de Pereira et al. (2013) e os dados experimental e numérico de Leite (2009) no instante  $t = 0.4s$  e para  $h = 10\text{cm}$**



**Figura 10. Comparativo entre os resultados numéricos 3D, resultados numéricos 2D de Pereira et al. (2013) e os dados experimental e numérico de Leite (2009) no instante  $t=0.4s$  e para  $h=12cm$**

Observa-se nessas figuras que os resultados numéricos 3D atingiram uma maior distância da frente de onda com relação aos resultados numéricos 2D de Pereira et al. (2013) e que melhor se aproxima da frente de onda dos dados experimentais de Leite (2009). Tal fato se explica pela presença das paredes laterais no caso 3D que, para um escoamento de fluidos não newtonianos, são relevantes no resultado final, pois interferem no cálculo da taxa de deformação.

**Tabela 4. Campos de pressão, velocidade e viscosidade do fluido nos instantes  $t = 0.0s$ ,  $t = 0.2s$  e  $t = 0.4s$  e  $L/dp = 125$ ,  $h = 12cm$ .**

| Tempo (s) | Pressão (Pa) | Velocidade (m/s) | Viscosidade (Pa.s) |
|-----------|--------------|------------------|--------------------|
| 0.0       |              |                  |                    |
| 0.2       |              |                  |                    |
| 0.4       |              |                  |                    |
|           |              |                  |                    |

A Tabela 4 ilustra os campos de pressão, velocidade e viscosidade do fluido 3D para o caso da altura de  $h = 12\text{cm}$ , resolução de  $L/dp$  125 e nos instantes de tempo  $t = 0.0\text{s}$ ,  $t = 0.2\text{s}$  e  $t = 0.4\text{s}$ , podendo assim visualizar o comportamento da frente de onda no decorrer do tempo.

### 3.2 Slump test

O segundo caso a ser analisado é o ensaio de *Slump*, um teste de campo padrão normatizado e utilizado na construção civil para a avaliação da trabalhabilidade do concreto. O ensaio consiste no enchimento de uma forma rígida com o formato de tronco de cone, aberto em ambas as extremidades, como ilustrado na Figura 11. Preenchido com o concreto a ser testado, a forma é então puxada verticalmente permitindo que o concreto flua em uma placa plana pela ação da gravidade. O fluido vai escoar apenas se a tensão de escoamento é excedida, caso contrário, para de fluir. Para concretos mais consistentes é feita a medição do abatimento, que é a diferença entre a altura inicial e final do tronco de cone. No caso dos concretos mais fluidos é feita a medição do diâmetro de espalhamento do concreto.

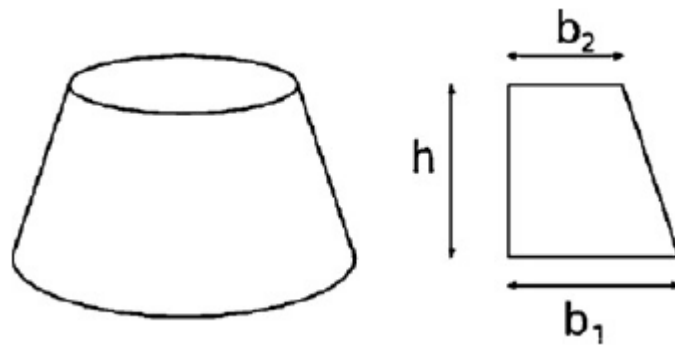


Figura 11. Geometria *Slump* (Fonte: Cremonesi)

Para este problema os parâmetros geométricos utilizados foram  $h = 300\text{mm}$ ,  $b1 = 100\text{mm}$  e  $b2 = 50\text{mm}$ , e os parâmetros reológicos foram os mesmos do trabalho de Cremonesi et al. (2010), que estão expressos na Tabela 5. O modelo reológico usado neste caso foi o modelo Bingham.

Tabela 5. Propriedades do fluido simulado

| $\tau_0[\text{Pa}]$ | $\mu[\text{Pa.s}]$ | $\rho[\text{kg/m}^3]$ |
|---------------------|--------------------|-----------------------|
| 50                  | 50                 | 2200                  |

Além disso, três resoluções diferentes foram utilizadas:  $b2/dp = 5, 10$  e  $12.5$ . O valor do passo temporal foi de  $0.0001\text{s}$ , sendo que, a quantidade de partículas, para cada uma das três resoluções, está apresentada na Tabela 6.

Tabela 6. Quantidade de partículas dos modelos

| Resolução ( $b2/dp$ ) | Quantidade de Partículas |
|-----------------------|--------------------------|
| 5                     | 30203                    |

|      |        |
|------|--------|
| 10   | 141723 |
| 12.5 | 239691 |

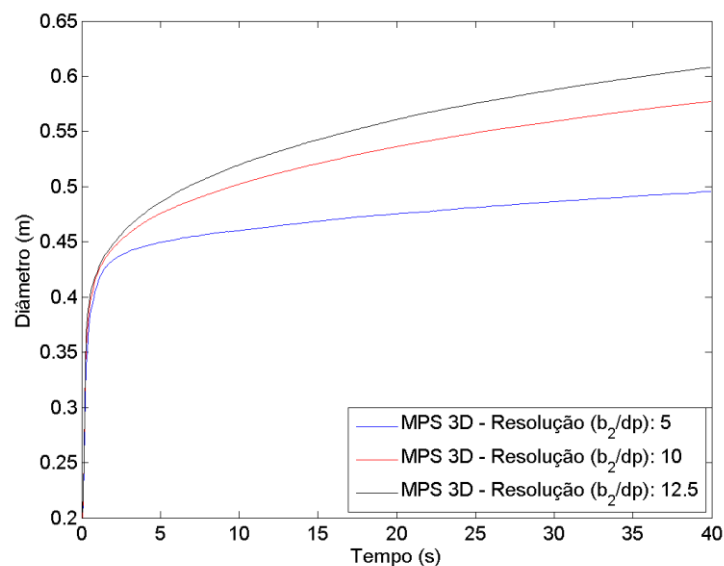
O tempo de processamento para cada caso, em um tempo real de simulação de 40 segundos, está apresentado na Tabela 7.

**Tabela 7. Tempo de processamento dos modelos**

| Resolução ( $b_2/dp$ ) | Tempo de processamento (horas) |
|------------------------|--------------------------------|
| 5                      | 24                             |
| 10                     | 133                            |
| 12.5                   | 143                            |

A Figura 12 mostra os resultados numéricos do diâmetro do espalhamento ( $2 \times b_1$ ) pelo tempo obtidos com o MPS, para as três resoluções. Já a Figura 13 mostra os resultados numéricos e experimentais obtidos por Cremonesi et al. (2010).

Analisando-se a Figura 12 pode-se perceber que, quanto mais refinada for a resolução das partículas, maior é o diâmetro do espalhamento e que este se aproxima dos valores obtidos por Cremonesi et al. (2010) (Figura 13). Porém a dinâmica do escoamento se dá de maneira diferente, sendo que a simulação realizada no simulador MPS apresenta uma taxa de variação do diâmetro mais elevada no início da simulação.



**Figura 12. Diâmetro do espalhamento em função do tempo para diferentes resoluções**

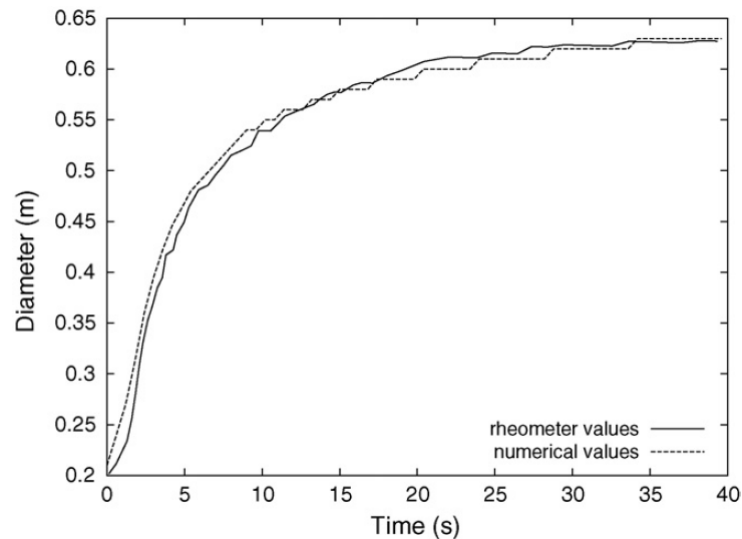


Figura 13. Resultados obtidos por Cremonesi (Fonte: Cremonesi et al. (2010))

O diâmetro teórico final obtido por Cremonesi et al. (2010) é dado segundo a Eq. (18) (ver Roussel & Coussot (2005)):

$$\tau_0 = \frac{7200\rho g V^2}{128\pi^2 D^5}, \quad (18)$$

na qual  $g$  é a aceleração da gravidade e  $V$  o volume do material. No caso em questão esse diâmetro mede 0.5944m.

A Tabela 8 apresenta os valores numéricos finais ( $t = 40.0s$ ) do diâmetro obtidos com o MPS e os respectivos erros, utilizando-se o diâmetro teórico como base.

Tabela 8. Diâmetro final da simulação e respectivo erro.

| Resolução<br>( $b2/dp$ ) | Diâmetro MPS<br>(m) | Erro (%) |
|--------------------------|---------------------|----------|
| 5                        | 0.511               | 14.03    |
| 10                       | 0.583               | 1.91     |
| 12.5                     | 0.613               | 3.13     |

Analisando a Tabela 8, pode-se perceber que a resolução mais elevada não representou melhores resultados. Tal fato decorre da dificuldade em se avaliar o instante em que o escoamento deveria cessar de escoar. Tal problema ocorre nos modelos reológicos em que há a presença de uma tensão limite de escoamento (modelo de Bingham e Herschel-Bulkley) devido a singularidade computacional para valores de taxa de deformação próximas de zero, sendo necessário uma melhor avaliação do gama crítico para se obter melhores resultados.

A variação da altura do corpo de cone ao longo do escoamento está ilustrada na

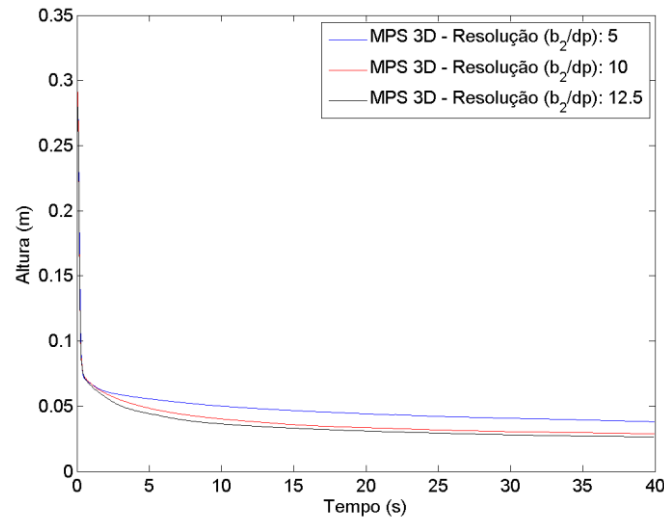


Figura 14, sendo que, quanto melhor for à resolução das partículas, menor será essa altura, e observa-se a tendência de convergir para resolução mais elevada.

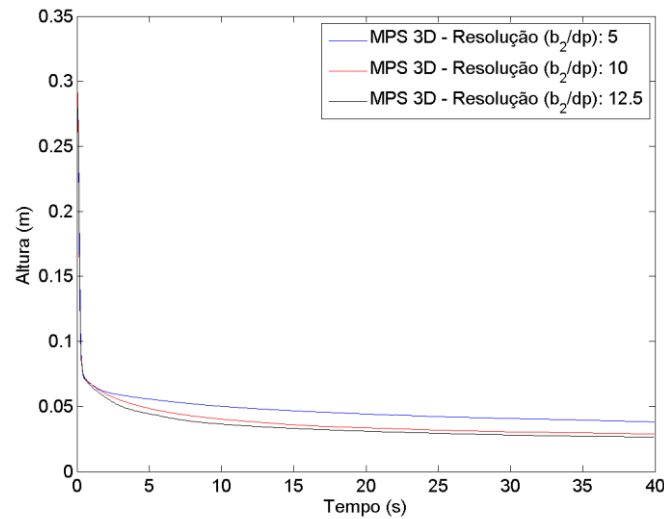
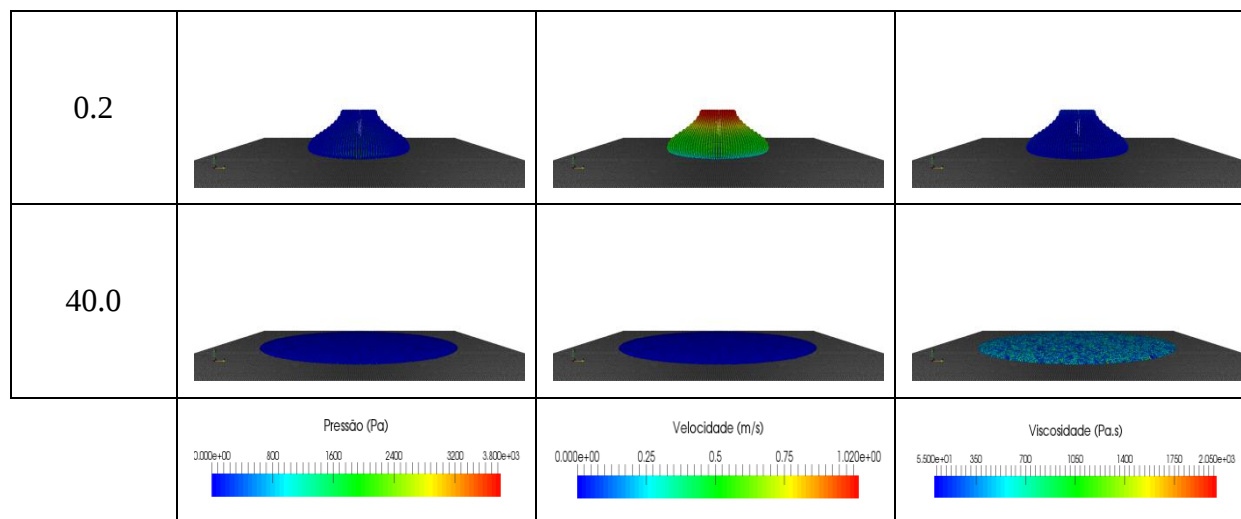


Figura 14. Altura em função do tempo para diferentes resoluções.

Por fim, a Tabela 9 ilustra os campos de pressão, velocidade e viscosidade do fluido 3D para o caso de resolução  $b_2/dp = 12.5$  e para três diferentes instantes de tempo.

Tabela 9 – Campos de pressão, velocidade e viscosidade do fluido 3D para  $b_2/dp = 12.5$

| Tempo (s) | Pressão (Pa) | Velocidade (m/s) | Viscosidade (Pa.s) |
|-----------|--------------|------------------|--------------------|
| 0.0       |              |                  |                    |



## 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho visou modelar e simular dois ensaios característicos da indústria para fluidos não newtonianos: *dam-break* e *slump*, ambos para o caso tridimensional, a fim de validar a metodologia implementada no código MPS. Tal validação se deu por meio da comparação dos resultados numéricos obtidos com o MPS com resultados encontrados na literatura.

Com relação ao problema *dam-break* com o Carbopol 940, os resultados numéricos 3D do MPS aproximaram-se satisfatoriamente dos resultados obtidos por Leite (2009). Pode-se notar que a superfície livre ficou mais bem definida no caso com resolução mais alta. Além disso, pode-se perceber que a geometria em 2D ou em 3D interfere no resultado final para o caso de escoamentos de fluidos não newtonianos.

Com relação a simulação do teste de *slump*, a modelagem implementada apresenta o espalhamento inicial mais rápido que o medido experimentalmente. Isso pode ser devido ao efeito do valor do gama crítico adotado no modelo e que necessita uma melhor avaliação a fim de se obter resultados mais fidedignos.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Pesquisa Científica (CNPq) pelo apoio financeiro no desenvolvimento deste trabalho.

## REFERÊNCIAS

Castro, A.L., 2007. *Aplicação de conceitos reológicos na tecnologia dos concretos de alto desempenho*. Tese de doutorado. EESC-USP, São Carlos.

- Cremonesi, M., Ferrara, L., Frangi, A., & Perego, U., 2010. Simulation of the flow of fresh cement suspensions by a Lagrangian finite element approach. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, vol. 165, n. 23-24, pp. 1555–1563. <http://doi.org/10.1016/j.jnnfm.2010.08.003>
- De Larrard, F., Ferraris, C. F., & Sedran, T., 1997. Fresh concrete: A Herschel-Bulkley material. *Materials and Structures*, vol. 31, n. 7, pp. 494–498.
- Ferraris, C. F., & De Larrard, F., 1998. Modified Slump Test to Measure Rheological Parameters of Fresh Concrete. *Cement, Concrete and Aggregates (CCAGDP)*, vol. 20, n. 2, pp. 241–247.
- Koshizuka, S., & Oka, Y., 1996. Moving-particle semi-implicit method for fragmentation of incompressible fluid. *Nuclear Science and Engineering*, vol. 123, n. 3, pp. 421–434.
- Lee, B. H., Park, J. C., Kim, M. H., & Hwang, S. C., 2011. Moving particle simulation for mitigation of sloshing impact loads using surface floaters. *Computer Modeling in Engineering and Sciences*, vol. 75, n. 2, pp. 89–112. <http://doi.org/10.3970/cmes.2011.075.089>
- Leite, L. O. B., 2009. *Determinação física e numérica de corridas de lama resultantes de ruptura de barreira retendo material viscoplástico*. Dissertação (mestrado). Universidade Estadual Paulista.
- Martin, J., & Moyce, W., 1952. An experimental study of the collapse of liquid columns on a rigid horizontal plate. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, series A*, vol. 244, pp. 312–324.
- Mechtcherine, V. & Shyshko, S., 2009. Self-Compacting Concrete Simulation using Distinct Element Method. 3<sup>rd</sup> *International RILEM Symposium on Rheology of Cement Suspensions such as Fresh Concrete*, pp. 171–179.
- Pereira, D. da S., Melo, P. S. S., Kurokawa, F. A., & Cheng, L.-Y., 2013. Uma modelagem numérica do escoamento do concreto fresco baseado no método Moving Particle Semi-implicit (MPS). In *Proceedings of the XXXIV Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering*.
- Paiovici, R., 2002. Rheological Behavior of Fresh Concrete. *The Annals of "Dunarea de Jos" University of Galati, Fascicle XIV, Mechanical Engineering*, pp. 63-66.
- Roussel, N., & Coussot, P., 2005. “Fifty-cent rheometer” for yield stress measurements: From slump to spreading flow. *Journal of Rheology*, vol. 49, n. 3, p. 705.
- Tsukamoto, M. M., 2006. *Desenvolvimento do método de partículas na representação de corpos flutuantes em ondas altamente não-lineares*. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica Universidade de São Paulo, São Paulo.