



## ESTUDO NUMÉRICO DA HIDRODINÂMICA NA VIZINHANÇA DE UMA JUNÇÃO A 45° DE UM SISTEMA PREDIAL DE ESGOTO

### Numerical investigation on the hydrodynamics in the vicinity of a building drainage 45° junction

Lucas Soares Pereira (1); Liang-Yee Cheng (2); Lúcia Helena Oliveira (3); Rubens Augusto Amaro Junior (4)

- (1) Engenheiro Civil, Universidade de São Paulo, São Paulo - SP, Brasil.  
(2) Dr. Prof., Universidade de São Paulo, São Paulo - SP, Brasil.  
(3) Dra. Profa., Universidade de São Paulo, São Paulo - SP, Brasil.  
(4) Ms. Engenheiro Civil, Universidade de São Paulo, São Paulo - SP, Brasil.  
Email para Correspondência: lucas\_pereira@usp.br; (P) Lucas Soares Pereira

**Resumo:** No presente estudo simulações numéricas são conduzidas para investigar em detalhes o processo hidrodinâmico na vizinhança de uma junção a 45° e avaliar a influência dessa singularidade no desempenho de um sistema de esgoto residencial. O estudo tem como objetivo contribuir para o entendimento do complexo escoamento com superfície livre de ramais e coletores de sistema de esgoto sanitário, visando assegurar a autolimpeza do sistema, mesmo com a redução de vazão pelo uso de equipamentos economizadores de água. Os casos simulados representam, de forma simplificada, os ramais e coletor de um banheiro, formado pelo ramal de descarga da bacia sanitária e pelo ramal de esgoto a jusante de uma caixa sifonada que recebe os efluentes de um chuveiro e um lavatório, ambos ligados por meio de uma junção a 45° a um tubo de queda. Considerando a curta duração da descarga da bacia sanitária em comparação com a duração do uso do chuveiro, a primeira pode ser modelada como um escoamento em regime transiente e a última como escoamento em regime permanente. Dependendo da vazão, diâmetro e declividade da tubulação, o encontro de ambos os escoamentos pode resultar na propagação de uma onda à montante dentro do ramal da bacia sanitária e fechamento temporário do ramal da caixa sifonada. Tendo em vista a complexidade do fenômeno hidrodinâmico, em termos de geometria e presença de superfície livre, simulações com um método sem malha, baseado em partículas, são realizadas. Por simplicidade, o efeito do ar dentro das tubulações não é considerado. Os resultados mostram que nas situações em que o diâmetro e declividade da tubulação são reduzidos, a descarga da bacia sanitária impacta fortemente o escoamento no interior do ramal de esgoto da caixa sifonada. Nessas condições, o ramal da caixa sifonada pode ser preenchido, quase que completamente, logo após o pico de vazão da descarga da bacia sanitária alcançar a junção de 45°, permanecendo assim entre 2 a 3 segundos, que é uma situação indesejada por aumentar o risco de aprisionamento do ar na tubulação e, assim, reduzir a capacidade de escoamento.

*Palavras chaves:* Sistema predial de esgoto sanitário; transporte de sólidos; simulações; método de partículas.



**Abstract:** In the present study numerical simulations are carried out to investigate in detail the hydrodynamics in the vicinity of a 45° junction of a building drainage network and evaluate its influence on the performance of the system. The study aims to contribute to better understanding of the complex flow inside a building drainage system and assure its self-cleaning performance considering the adoption of the sustainable equipments and practices. The simulated cases represent a simplified bathroom drainage system, with a main pipe connecting a water closet and a secondary pipe from a shower and lavatory, both connected by an 45° junction to a vertical stack. As the duration of the flush from water closet is much shorter than those from a shower, the first can be modeled as transient flow and the last as a steady flow. Depending on the flow rate, pipe diameter and slope, the encounter of both flows might result in a complex mixing and a traveling wave that propagates backward inside the main pipe and the flow blockage in the secondary pipe. Due to high nonlinearity of the phenomenon that involves complex geometry and free surface, simulations using fully Lagrangian meshless particle-based method are carried out. For sake of simplicity, the effects of the air inside the drainage system were neglected. The results show that when the main pipe diameter and declivity are reduced, the flush from the water closet strongly impact the flow inside the secondary pipe. In such situation, the secondary pipe can be almost fully filled soon after the peak flow rate of the water closet achieve the 45° junction and it lasts filled during 2 - 3 seconds, which is an undesirable situation that increases the chance of air entrapment inside the piping system and could reduce the flow capability of the system.

**Keywords:** *Building drainage system; waste transport; simulation; particle method.*



## 1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a adoção de equipamentos economizadores de água e a popularização de práticas sustentáveis tem reduzido a vazão de sistemas de esgoto sanitário residenciais, o que pode levar ao comprometimento da capacidade de transporte de sólidos em ramais e coletores horizontais e a capacidade autolimpante do sistema. Essas mudanças têm sido investigadas por vários autores, destacando-se estudos baseados em abordagens experimentais (Akiyama, Otsuka and Shigefuji, 2013, 2014; C. L. Cheng *et al.*, 2013), devido à complexidade do fenômeno hidrodinâmico envolvido. Entretanto, alguns trabalhos baseados em simulações numéricas também podem ser encontrados (Gormley and Jean, 2012; Lee, Yu and Xu, 2013).

Em trabalhos anteriores, os autores utilizaram um método computacional baseado em partículas conhecido como *Moving Particle Semi-implicit* (MPS) (Koshizuka and Oka, 1996) para modelar o transporte sólido em uma tubulação horizontal (Cheng *et al.*, 2016; Cheng *et al.*, 2016; Cheng *et al.*, 2017). No presente estudo o objetivo é conduzir uma investigação mais detalhada do processo hidrodinâmico na região de uma junção a 45°. O modelo usado representa simplificada um banheiro, sendo um ramal conectado a montante a uma bacia sanitária e um ramal conectado a montante a um conjunto de lavatório e chuveiro, ambos ligados a jusante por uma junção a 45°. Considerando a curta duração da descarga da bacia sanitária em comparação com a longa duração da utilização do chuveiro, a primeira pode ser modelada como um escoamento em regime transiente e a última como escoamento em regime permanente.

Além do estudo dos fenômenos hidrodinâmicos na vizinhança da junção, é investigado o efeito dessa singularidade para o transporte de sólidos. O modelo é praticamente o mesmo utilizado para o estudo hidrodinâmico, onde a única diferença é a presença de um cilindro a montante da tubulação principal. As características geométricas e o material constituinte desse cilindro foram adotados como uma aproximação da situação real de funcionamento desse sistema e baseado em investigação experimental encontrada na literatura (Akiyama, Otsuka and Shigefuji, 2014). Considerando a baixa vazão, o ar dentro das tubulações e a variação de pressão devido ao seu aprisionamento são negligenciados neste trabalho.

## 2 MÉTODO NUMÉRICO

O método computacional adotado nesse estudo para simular o complexo escoamento de um sistema de esgoto residencial é o *Moving Particle Semi-implicit* (MPS), originalmente proposto para simular escoamentos incompressíveis com superfície livre. O MPS é um método lagrangiano baseado em partículas, onde as equações governantes são resolvidas substituindo operadores diferenciais por operadores diferenciais discretos derivados a partir da ponderação das contribuições das partículas vizinhas por uma função peso.

O método MPS adota um algoritmo semi-implícito que é dividido em duas partes. O primeiro passo consiste no cálculo explícito da velocidade e posição das partículas



considerando viscosidade e forças externas da equação de conservação de quantidade de movimento. A segunda parte é composta pelo cálculo implícito da pressão, ao resolver um sistema linear de equação de Poisson para a pressão derivado da equação de conservação de massa, garantindo assim a incompressibilidade do fluido. Nesse trabalho foi utilizada computação paralelizada distribuída em cluster de PC apresentada por Fernandes *et al.* (2015). Descrições mais detalhadas do método MPS, incluindo o tratamento das condições de contorno, podem ser encontradas em Koshizuka and Oka (1996) e em trabalhos anteriores dos autores (Cheng, Oliveira and Favero, 2012; Cheng *et al.*, 2013; Cheng *et al.*, 2014).

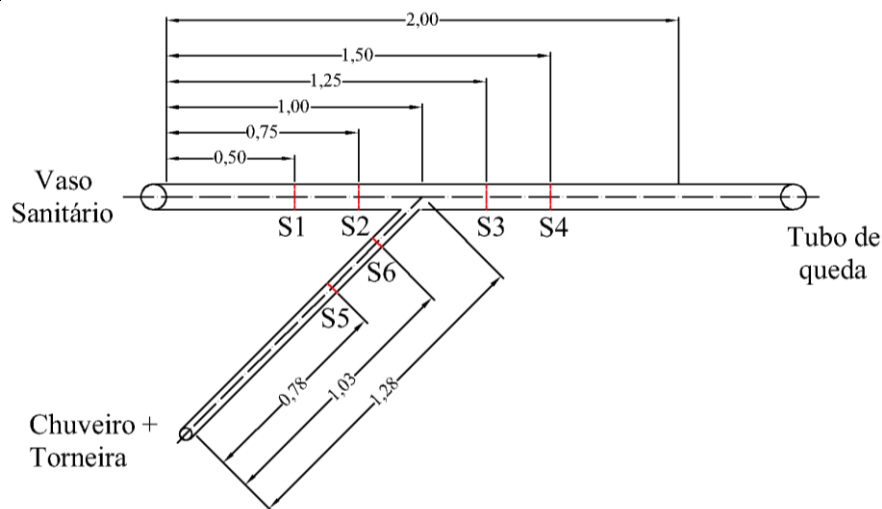
## 2.1 Contato entre sólidos

O movimento do sólido é calculado com base nas forças e momentos obtidos pela integração da pressão na superfície do sólido, ou seja, a pressão do fluido nas partículas de parede, e pelas forças de contato/colisão entre sólidos. Vale ressaltar que valores de centro de gravidade, massa  $m$  e momento de inércia  $I$  são parâmetros de entrada no programa.

Um modelo do tipo mola-amortecedor, inspirado na formulação do método *Discrete Element Method* (DEM) (Cundall & Strack, 1979) foi utilizado para representar as forças de contato/colisão entre os sólidos (Amaro Junior, Osello, & Cheng, 2017). A colisão ou contato é detectada quando o módulo da distância de colisão é menor que a distância inicial entre partículas adjacentes  $l_0$ . As forças normais entre o par de partículas, pertencentes à superfície de dois corpos rígidos diferentes em contato/colisão, são aproximadas pela teoria de contato elástico não-linear de Hertz (Johnson, 1985). As forças tangenciais entre o par de partículas mais próximas são obtidas pelo componente com menor valor absoluto, onde um componente segue a lei de atrito de Coulomb e o outro é devido a forças tangenciais de repulsão e de amortecimento. As forças de contato dos corpos rígidos são obtidas pela média das forças das partículas em contato. Além das forças, a média dos momentos gerados pelas forças de contato/colisão é aplicada no centro de massa do sólido.

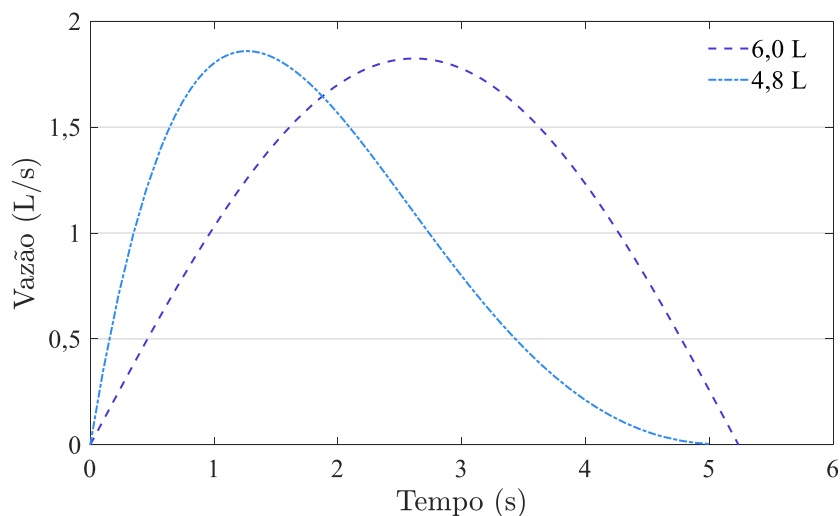
## 3 DESCRIÇÃO DOS CASOS SIMULADOS

No presente trabalho, prosseguindo com o estudo desenvolvido em Cheng *et al.* (2013), o modelo simulado representa simplificada um sistema de esgoto de um banheiro, sendo um ramal de descarga de uma bacia sanitária e um ramal de esgoto recebendo os efluentes de um chuveiro e um lavatório, ambos conectados por meio de uma junção a 45° com um tubo de queda. De forma a monitorar a profundidade do escoamento próximo a junção, 6 sensores foram posicionados nas seções S1 – S6, como ilustrado na Figura 1, na qual as principais dimensões do sistema também são apresentadas.



**Figura 1 – Dimensões e posições dos pontos de investigação**

Dois diâmetros, 75 mm e 100 mm, foram investigados para o ramal de descarga, que conecta a bacia sanitária, enquanto que o diâmetro do ramal de esgoto, a jusante do chuveiro e lavatório, foi mantido constante e igual a 50 mm em todas as simulações. Além disso, foram consideradas três declividades: 0, 1% e 2%. Considerando o tempo de uso dos equipamentos hidráulicos simulados nesse trabalho, o fluxo do chuveiro foi considerado permanente (maior duração, alguns minutos), enquanto a descarga da bacia sanitária foi considerada transiente (curta duração, poucos segundos). Como dado de entrada, vazões constantes de 0,15 L/s e 0,20 L/s foram consideradas no lavatório e no chuveiro, respectivamente. Dessa forma, uma vazão constante de 0,35 L/s foi imposta como condição de contorno a montante da tubulação secundária. Por outro lado, foram considerados dois perfis de vazão relativos as bacias sanitárias com volume de descarga de 4,8 L e 6,0 L como condição de contorno a montante do ramal de descarga da bacia sanitária. A Figura 2 mostra as curvas de vazão de descarga de bacias sanitárias obtidas experimentalmente.



**Figura 2 – Perfis de vazão de descarga do vaso sanitário ao longo do tempo**

As Eq. (1) e (2) foram utilizadas para reproduzir as descargas ( $Q(t)$ ) das bacias sanitárias de 6,0 L e 4,8 L, respectivamente.

$$Q(t) = 1,824 \times \cos(0,60 \times t - \pi/2) \quad (1)$$

$$Q(t) = -0,00006 \times t^6 + 0,0032 \times t^5 - 0,0611 \times t^4 + 0,543 \times t^3 - 2,2665 \times t^2 + 3,5833 \times t \quad (2)$$

Nas simulações numéricas, o fluxo da torneira e do chuveiro foi liberado no instante inicial, enquanto a descarga da bacia sanitária foi liberada após a estabilização do escoamento no interior das tubulações, o que ocorre aproximadamente após 10 segundos. A duração total das simulações foi igual a 20 segundos.

A simulação do efeito da singularidade no transporte de sólidos foi realizada utilizando um cilindro de 30 mm de diâmetro e 80 mm de comprimento. O sólido livre está posicionado a montante do ramal da bacia sanitária no instante inicial. De forma a facilitar as análises foram realizadas duas simulações para cada caso, uma sem e outra com o sólido, como apresentado na Tabela 1. A primeira foi utilizada para a análise dos fenômenos hidrodinâmicos e a segunda para análise do transporte de sólidos.

**Tabela 1 – Casos simulados**

Casos	Volume Bacia Sanitária (L)	Diâmetro (mm)	Declividade (%)
V48D075A0	4,8	75	0
V48D075A1	4,8	75	1
V48D075A2	4,8	75	2
V48D100A0	4,8	100	0
V48D100A1	4,8	100	1
V48D100A2	4,8	100	2
V60D075A0	6,0	75	0
V60D075A1	6,0	75	1
V60D075A2	6,0	75	2
V60D100A0	6,0	100	0
V60D100A1	6,0	100	1
V60D100A2	6,0	100	2

Os materiais considerados para o estudo de transporte de sólido foi PVC para a tubulação e PVA para o sólido, seguindo trabalho experimental encontrado na literatura (Akiyama, Otsuka and Shigefuji, 2014). As propriedades dos materiais como densidade  $\rho$ , massa  $m$ , coeficiente de Poisson  $\nu$  e módulo de Young  $E$  (Karimi *et al.*, 2014), além de parâmetros numéricos como coeficiente de colisão  $\xi_n$  e coeficiente de atrito



numérico  $\mu$ , como apresentados na Tabela 2, foram utilizadas para simulação de sólido livre.

**Tabela 2 – Propriedades dos materiais**

Sólido	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$m$ (kg)	$\nu$	$E$ (GPa)	$\xi_n$	$\mu$
Cilindro	1010	0,06	0,45	0,03	0,05	-
Tubulação	$\infty$	$\infty$	0,4	3	-	0,22

As simulações numéricas foram conduzidas utilizando distância inicial entre partículas de 2 mm, passo de tempo de  $10^{-4}$ s e duração total de 20 segundos para cada caso. O valor de  $\beta$  do modelo de superfície livre usado nesse trabalho é igual a 0,97.

Considerando a distância entre partículas de 2 mm, os modelos têm aproximadamente 1,1 milhão de partículas no instante inicial e 1,6 milhão de partículas no instante final, após as descargas. O tempo de processamento de cada caso é de aproximadamente 50 horas usando 8 nós do cluster do Tanque de Provas Numérico (TPN/USP).

## 4 RESULTADOS

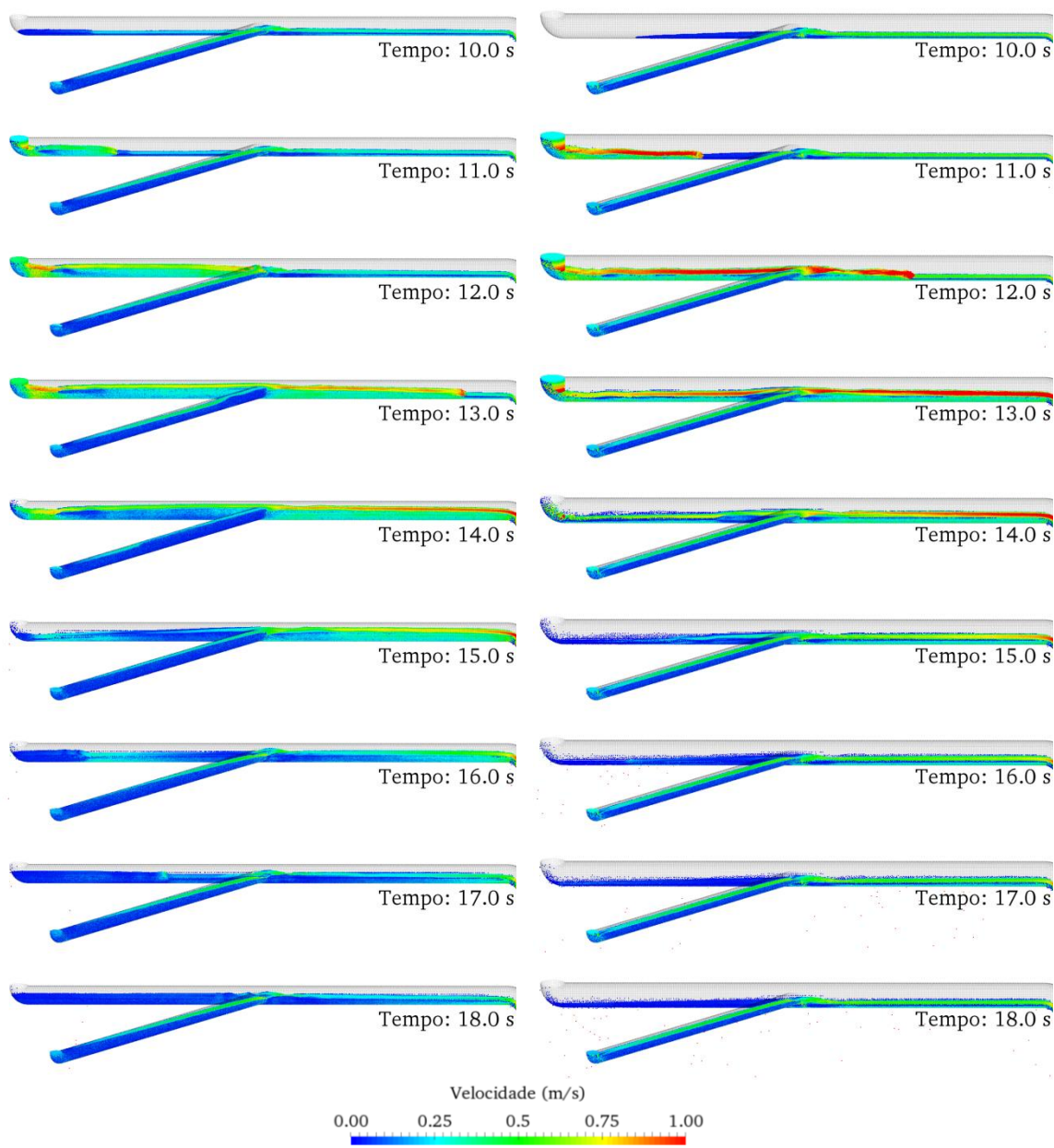
### 4.1 Investigação hidrodinâmica

A Figura 3 apresenta uma sequência de imagens das simulações computacionais dos casos V60D075A0 e V48D100A2. Nessas imagens são mostradas as vistas da tubulação horizontal, com a escala de cores representando a magnitude da velocidade do escoamento. Os casos apresentados são dois extremos das configurações de simulação, sendo o caso V60D075A0, de maior vazão, menor diâmetro e menor declividade, e o caso V48D100A2, de menor vazão, maior diâmetro e maior declividade.

A sequência da Figura 3 (a) mostra o escoamento dentro da tubulação para o caso V60D075A0. No instante 10s a descarga da bacia sanitária é liberada. Entre 11s e 13s, a frente de onda gerada pela descarga da bacia sanitária avança, passando pela junção a 45°. Entre 13s e 15s, a altura da lâmina d'água no ramal do chuveiro e lavatório aumenta no sentido de jusante para montante, sendo que no instante 15s o tubo secundário encontra-se quase totalmente preenchido. Após o fim da descarga, é possível notar a formação de uma onda que se propaga a montante dentro do ramal da bacia sanitária. Entre 15s e 16s, a onda alcança o início da tubulação. No instante 17s a onda retorna, alcançando a junção aproximadamente no instante 18s. A altura da lâmina d'água no interior do ramal do chuveiro e lavatório diminui após o fim da descarga da bacia sanitária, retornando à condição inicial após 18s.

A sequência de imagens da Figura 3 (b) mostra o escoamento do caso V48D100A2. Após a frente de onda da descarga atingir a junção, entre 11s e 12s, a altura da lâmina d'água no interior do ramal do chuveiro e lavatório permanece inalterada. Além disso, nesse caso não é possível observar a formação da onda que se propaga a montante no

ramal da bacia sanitária. Nessa situação, o escoamento retorna rapidamente a condição inicial após o término da descarga da bacia sanitária.

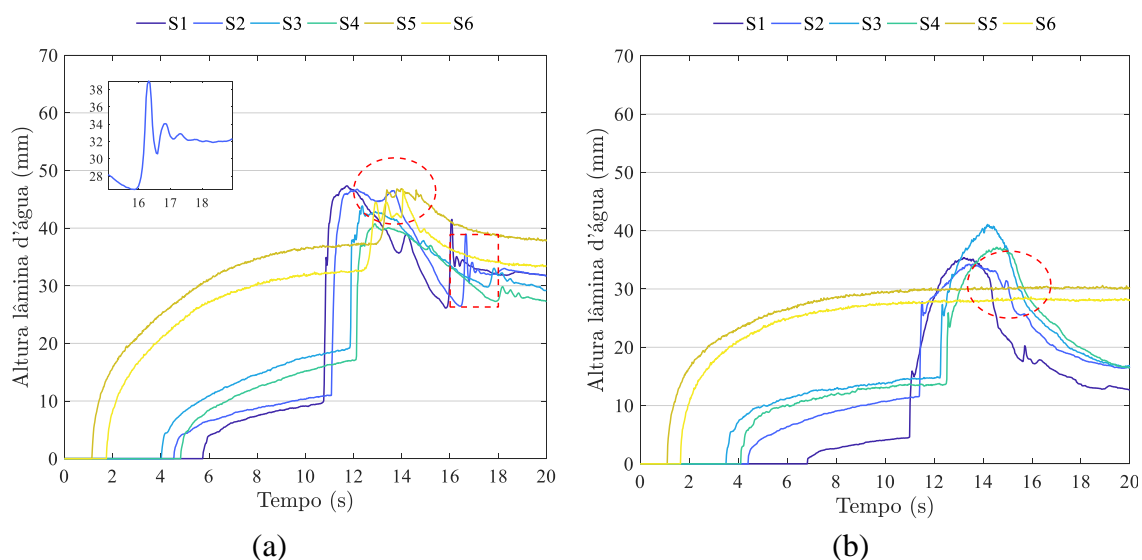


**Figura 3 – Sequencia de imagens obtidas das simulações dos casos (a) V60D075A0 e (b) V48D100A2**

A Figura 4 mostra as séries temporais da altura da lâmina d’água registradas pelos sensores nas seções S1 a S6 para dois casos diferentes, V48D075A0 e V60D100A2. Em ambos os casos, nos instantes iniciais, a altura da lâmina aumenta no ramal do chuveiro e do lavatório (S5 e S6) até alcançar patamar, quando o escoamento está em regime permanente. De acordo com a Figura 4 (a), na simulação V48D075A0 o nível da lâmina



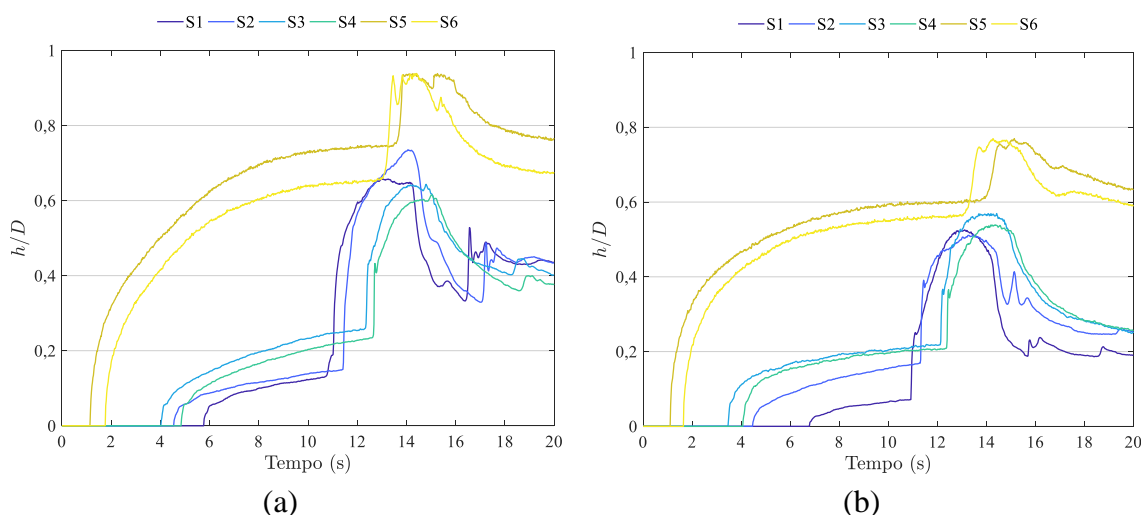
d'água antes da descarga da bacia sanitária está próximo a 37 mm em S5 e 33 mm em S6. Comparativamente para o caso V60D100A2 apresentado na Figura 4 (b), a altura da lâmina d'água está próxima a 30 mm em S5 e 28 mm em S6, após alcançar regime permanente. Após a descarga ( $t > 10s$ ), a altura da lâmina no ramal da bacia sanitária aumenta instantaneamente. Para o caso V48D075A0 apresentado na Figura 4 (a), a altura da lâmina do sensor da seção S2 aumenta até alcançar um primeiro pico relacionado à passagem da frente de onda gerada pela descarga, e após uma pequena redução a altura alcança um segundo pico, que é indicado pelo círculo com linha tracejada. Este pico secundário está relacionado com o choque da frente de onda da descarga da bacia sanitária e do escoamento proveniente do ramal do chuveiro e do lavatório na região da junção, o que origina a onda que se propaga a montante no ramal da bacia sanitária. A variação da altura da lâmina d'água na seção S2 decorrente da onda gerada está destacada no lado esquerdo superior do gráfico, sendo que no caso V48D075A0 a variação é de aproximadamente 10 mm, como apresentado na Figura 4 (a), e no caso V60D100A2 a flutuação não foi observada, conforme Figura 4 (b).



**Figura 4 – Lâmina d'água dos sensores S1 a S6 dos casos (a) V48D075A0 e (b) V60D100A2**

Uma consequência da descarga da bacia sanitária para casos cujo ramal da bacia sanitária apresenta 75 mm de diâmetro é o aumento da altura da lâmina d'água no ramal do lavatório e do chuveiro. A Figura 5 mostra a série temporal da altura de lâmina d'água ( $h$ ) normalizada pelo respectivo diâmetro da tubulação ( $D$ ), sendo dois diâmetros utilizados para o ramal da bacia sanitária: 75 mm e 100 mm, e para o ramal do chuveiro e do lavatório 50 mm. A relação  $h/D$  representa o preenchimento das seções da tubulação nas posições dos sensores, sendo que o valor de preenchimento próximo a 1,0 significa que a seção da tubulação está próxima a ser estrangulada, e que nessas condições o efeito do aprisionamento de ar dentro da tubulação não pode ser negligenciado. Enquanto no escoamento de superfície livre o fluido está sujeito a pressão atmosférica, no escoamento forçado o aumento de pressão tem como consequência a redução da capacidade de vazão da tubulação, além de efeitos indesejados em sifões. Ao mesmo tempo, é uma situação que foge do limite de validade

da modelagem adotada aqui. Enquanto no caso V60D075A0, apresentado na Figura 5 (a), os valores de preenchimento das seções S5 e S6 permanecem acima de 0,8 por 2 a 3 segundos, indicando possível alteração para regime forçado, no caso com maior declividade V60D075A2, apresentado na Figura 5 (b), os valores de preenchimento dessas mesmas seções permanecem abaixo de 0,8 durante toda a simulação.



**Figura 5 – Preenchimento da tubulação nas posições dos sensores dos casos (a) V60D075A0 e (b) V60D075A2**

A Tabela 3 contém os máximos valores de preenchimento  $h/D$  da seção S6 (ramal do chuveiro e do lavatório) para todos os casos. Comparativamente quando o diâmetro do ramal da bacia sanitária considerado é 75 mm, os valores de preenchimento da seção são maiores do que os casos semelhantes com diâmetro de 100 mm. O aumento da declividade considerando situações semelhantes acarreta a redução do pico de preenchimento observado. A mudança da curva de vazão entre 4.8 L e 6.0 L não apresenta diferenças com relação ao pico de preenchimento do ramal do chuveiro e do lavatório.

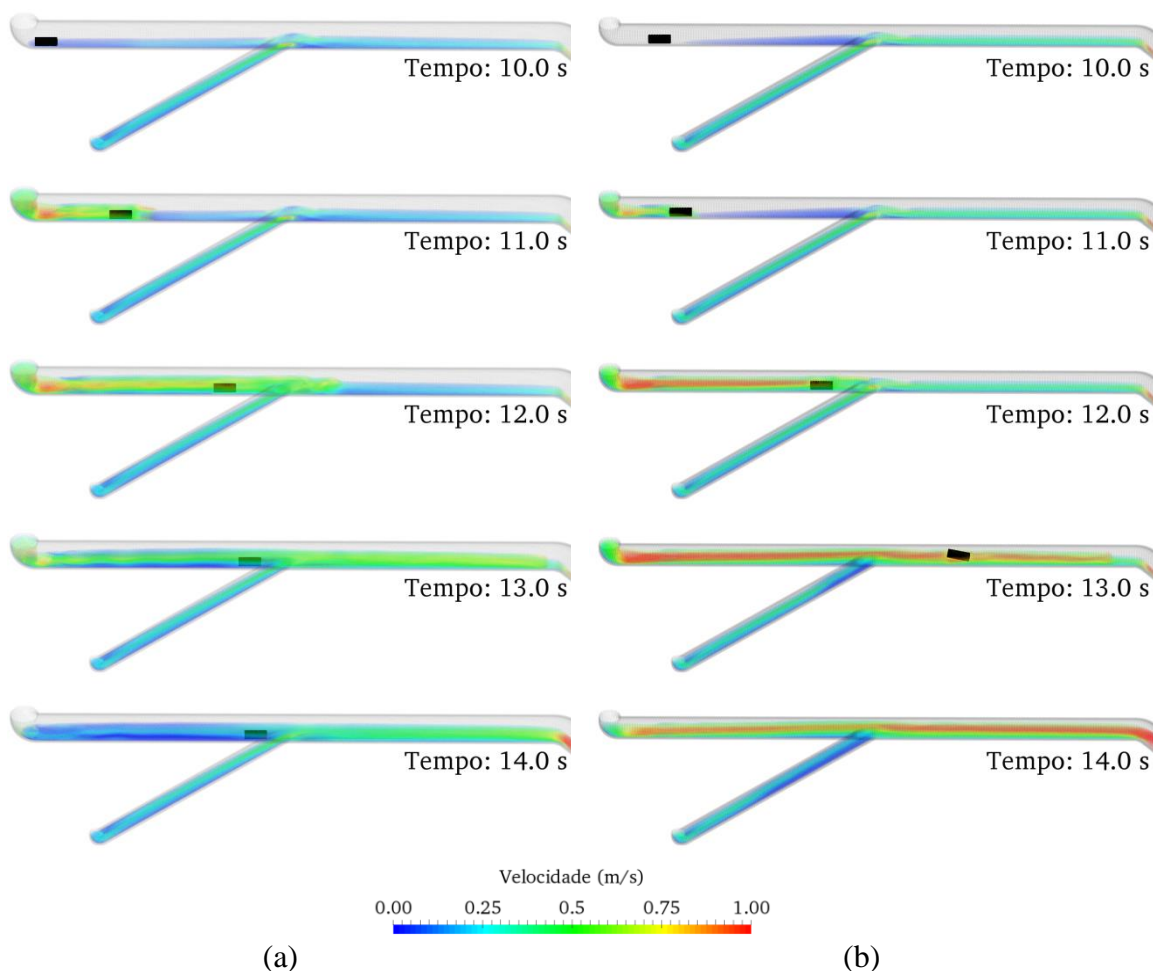
**Tabela 3 – Valores máximos das relações  $h/D$  (preenchimento) dos sensores S6 para todos os casos**

	4.8 L		6.0 L	
	75 mm	100 mm	75 mm	100 mm
0 %	0,937	0,756	0,939	0,767
1 %	0,844	0,681	0,916	0,691
2 %	0,731	0,609	0,770	0,612

## 4.2 Transporte de sólidos

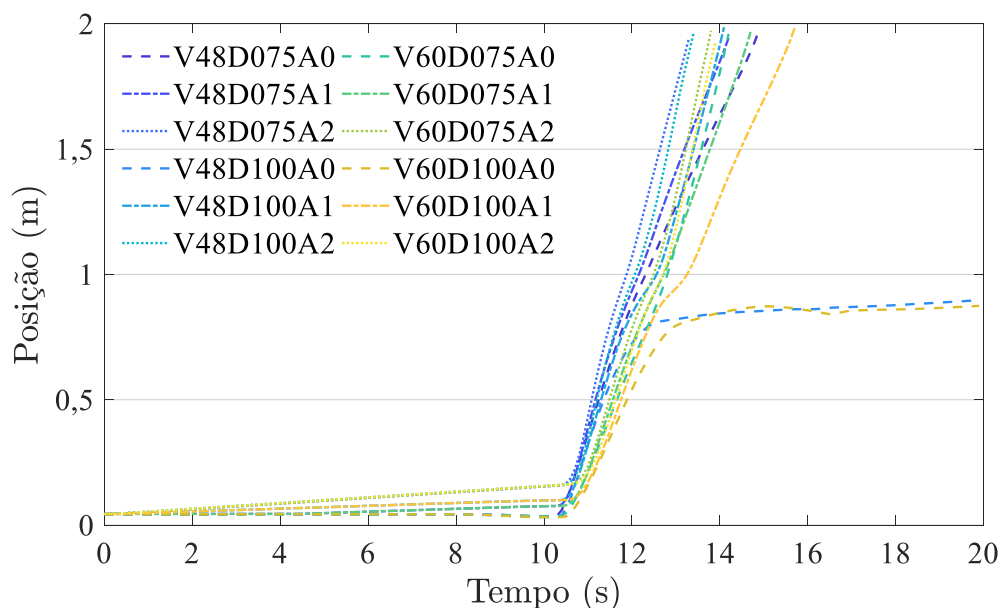
A partir do modelo utilizado para os estudos hidrodinâmicos foram realizadas simulações com a presença de um corpo livre (cilindro de 30 mm de diâmetro e 80 mm de comprimento) posicionado a montante do ramal da bacia sanitária, de forma a

representar o fenômeno de transporte de sólidos de um sistema de esgoto sanitário. As Figura 6 (a) e (b) apresentam sequência de imagens obtidas das simulações com a presença de sólido livre dos casos V48D100A0 e V60D075A2, respectivamente. Enquanto na sequência de imagens do caso V48D100A0 o sólido é bloqueado perto da junção e não atinge a tubulação de queda durante o tempo de simulação, no caso V60D075A2 o sólido alcança o tubo de queda em menos de 4s após a liberação da descarga da bacia sanitária.



**Figura 6 – Sequencia de imagens obtidas das simulações com a presença de sólido livre dos casos (a) V48D0100A0 e (b) V60D075A2**

A Figura 7 apresenta gráfico de deslocamento do cilindro através do ramal da bacia sanitária para todos os casos simulados. A junção e o tubo de queda estão a 1 m e 2 m no sistema de coordenadas adotado, respectivamente, e no instante inicial o cilindro está localizado próximo ao zero.

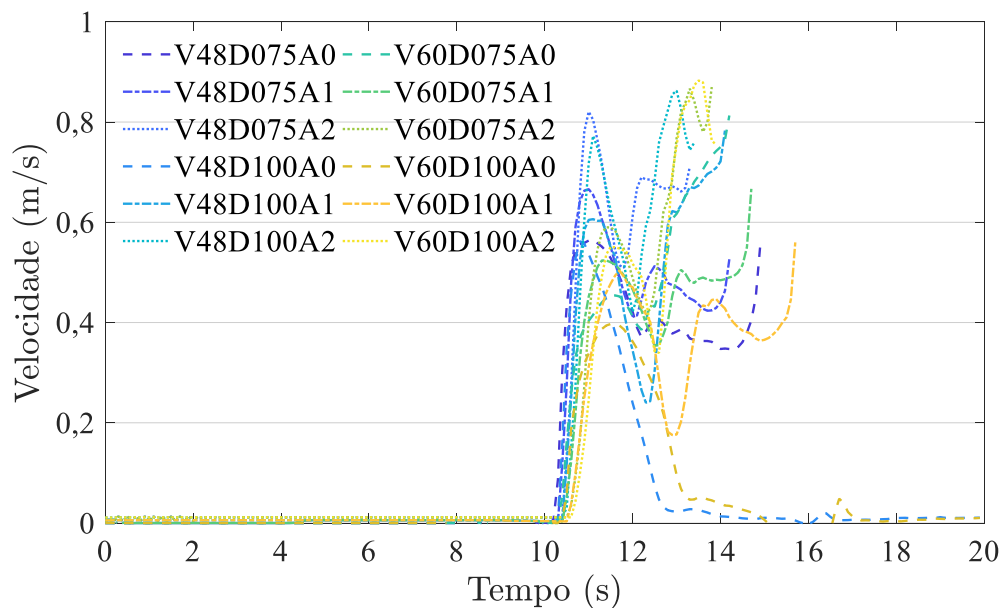


**Figura 7 – Deslocamento do cilindro durante a simulação**

Durante os primeiros 10 s, enquanto apenas o escoamento proveniente do ramal do chuveiro e do lavatório progride, o sólido apresenta um pequeno deslocamento para declividades de 1% e 2%. A partir de 10s, a descarga da bacia sanitária é liberada. No instante que a descarga atinge o sólido as curvas apresentam uma inflexão. De uma forma geral, pode-se notar que em grande parte dos casos o sólido alcançou o tubo de queda antes do tempo de simulação, sendo as únicas exceções os casos V48D100A0 e V60D100A0.

Considerando os casos nos quais o sólido alcançou o tubo de queda, o tempo necessário para percorrer a tubulação foi menor nos casos de maior declividade (2%), que são representados pelas linhas pontilhadas. Nessas situações o corpo livre demora de 2 a 3 segundos após o impacto da descarga para alcançar o final da tubulação. Por outro lado, observando os casos em que o sólido não alcança o tubo de queda, apesar das curvas desses casos apresentarem grandes semelhanças com as demais nos instantes iniciais, aos 12s as curvas apresentam uma segunda inflexão, permanecendo próximo a 0,9 m. Nessas situações os sólidos não ultrapassaram a junção a 45°.

A Figura 8 apresenta as curvas de velocidade dos sólidos de todos os casos simulados até alcançarem o tubo de queda. No instante inicial a velocidade do sólido está próxima de zero e a partir de 10s, quando a descarga da bacia sanitária é liberada, o cilindro é acelerado. Os casos com diâmetro menor (75 mm) apresentam maior aceleração nesse primeiro momento, devido a maior velocidade de impacto do fluido. Nesse primeiro instante as forças impulsivas hidrodinâmicas são preponderantes.



**Figura 8 – Velocidade do cilindro durante a simulação**

Em geral, após o impacto da frente de onda da descarga da bacia sanitária o sólido acelera até alcançar um pico de velocidade próximo a 11s. Comparando os diversos casos simulados, esse pico de velocidade varia entre 0,4 m/s (V60D100A0) e 0,8 m/s (V60D075A2). Essa diferença de valor entre velocidades máximas pode ser resultante de uma segunda fase do movimento, onde as pressões hidrostáticas do escoamento são preponderantes, sendo a declividade fator fundamental.

O efeito da presença dessa singularidade pode ser notado em todos os casos a partir da desaceleração do sólido ao se aproximar da junção a 45°, chegando em alguns casos (V60D100A0 e V48D100A0) a depositar o sólido antes de alcançar o tubo de queda. Nos demais casos, após a passagem pela junção, o sólido volta a acelerar, como por exemplo no caso V60D075A1, onde o sólido tem sua velocidade reduzida a 0,2 m/s, mas volta a acelerar, alcançando velocidade final de 0,5 m/s. Após a passagem pela junção, a declividade é preponderante para a velocidade final.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesse trabalho foram realizadas simulações para investigar os processos hidrodinâmicos na vizinhança de uma junção a 45° e a influência dessa singularidade no transporte de sólidos. O modelo simulado foi uma simplificação de um sistema de esgoto residencial de um banheiro.

Nos casos de ramal da bacia sanitária com diâmetro menor (75 mm) foi possível observar a presença de uma onda que se propaga a montante, gerada pelo encontro entre os escoamentos no interior da junção. Constatou-se que a magnitude da altura da onda aumenta com a diminuição da declividade do caso. No caso de tubulação horizontal foi possível observar altura de até 10 mm.





Considerando o ramal do chuveiro e do lavatório, a altura da lâmina d'água em seu interior depende do diâmetro do ramal da bacia sanitária. Para diâmetro de 75 mm e baixas declividades, o preenchimento das seções monitoradas alcançaram valores máximos de 94%, sendo que o preenchimento se manteve superior a 80% durante um período de 2 a 3 segundos. Apesar do modelo computacional não considerar a presença de ar dentro da tubulação, o alto nível de preenchimento pode indicar mudança de regime de escoamento de superfície livre para regime de escoamento forçado, o que deve ser evitado, pois o regime forçado é caracterizado pela menor capacidade de vazão e acarretar problemas em sifões.

Em relação as simulações de transporte de sólido, foi possível notar dois casos em que o cilindro não conseguiu ultrapassar a junção a 45°: V48D100A0 e V60D100A0. A baixa velocidade do fluido, no momento de impacto com o sólido, resultou numa baixa aceleração ao corpo e a baixa declividade reduziu a velocidade máxima alcançada no trecho a montante da junção a 45°. Nos demais casos também é possível observar a redução da velocidade do sólido decorrente da passagem pela singularidade.

Os próximos passos do estudo devem considerar a comparação dos resultados computacionais com resultados experimentais, além de adequação do modelo para considerar o efeito do ar dentro da tubulação do sistema de esgoto sanitário.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq – Brasil (442920/2014-8) e a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP (2015/22589-1) pelo suporte financeiro ao estudo de impacto da redução do consumo de água no dimensionamento de sistemas de esgoto sanitários. Os autores também gostariam de agradecer ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES pelas bolsas de mestrado e doutorado concedidas.

## REFERÊNCIAS

Akiyama, K., Otsuka, M. and Shigefuji, H. (2013) 'A Study on a Method of Predicting the Discharge Characteristics of Water-Saving Toilets when Installed to the Fixture Drain', *International Symposium Cib W062 on Water Supply and Drainage for Buildings*, (1), pp. 185–196.

Akiyama, K., Otsuka, M. and Shigefuji, H. (2014) 'Basic study on a method for predicting the waste-carrying performance in the horizontal fixture drain', *Annual Meeting the Society of Heating, Air-conditioning and Sanitary Engineers of Japan*, 1, pp. 89–92.

Amaro Junior, R. A.; Osello, P. H. S.; Cheng, I.-Y. Moving particle simulation with solid-solid contact. *V International Conference on Particle-based Methods – Fundamentals and Applications*, 2017.

Cheng, C. L. *et al.* (2013) 'Empirical approach to main drain system design and solid



transportation performance in buildings’, *Building Services Engineering Research and Technology*, 34(4), pp. 393–406. doi: 10.1177/0143624412460239.

Cheng, L.-Y. *et al.* (2013) ‘Simulation of drainage system in building using particle-based numerical method.’, in *International Symposium Cib W062 on Water Supply and Drainage for Buildings*, pp. 77–91.

Cheng, L.-Y., Oliveira, L. H., *et al.* (2016) ‘A numerical modeling of solid waste transport in main drain’, in *International Symposium Cib W062 on Water Supply and Drainage for Buildings*, pp. 1–10.

Cheng, L.-Y., Oliveira, L. H., *et al.* (2016) ‘Simulação Computacional Do Transporte De Sólidos Em Sistemas Prediais De Esgoto Sanitário.’, *Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído*, pp. 4436–4448.

Cheng, L.-Y. *et al.* (2017) ‘A numerical investigation on the hydrodynamic impact loads of the solid waste transport inside main drains’, in *International Symposium Cib W062 on Water Supply and Drainage for Buildings*, pp. 463–474.

Cheng, L.-Y., Oliveira, L. H. and Favero, E. H. (2012) ‘Particle-based Numerical Analysis of Drainage Flow inside Building System.’, *International Symposium Cib W062 on Water Supply and Drainage for Buildings*, (1), pp. 227–238.

Cheng, L. Y. *et al.* (2014) ‘A numerical study on waste transport in main drain’, in *International Symposium Cib W062 on Water Supply and Drainage for Buildings*, pp. 1–12.

Cundall, P. A.; Strack, O. D. L. A discrete numerical model for granular assemblies. *Geotechnique*, 29, 1979. 47-65

Fernandes, D. T. *et al.* (2015) ‘A domain decomposition strategy for hybrid parallelization of moving particle semi-implicit (MPS) method for computer cluster’, *Cluster Computing*, 18(4), pp. 1363–1377. doi: 10.1007/s10586-015-0483-3.

Gormley, M. and Jean, N. (2012) ‘Modelling solid transport in shallow gradient pipe installations : application to simplified sewerage in an international development context’, *International Symposium Cib W062 on Water Supply and Drainage for Buildings*, (1), pp. 265–276.

Karimi, A. *et al.* (2014) ‘A comparative study on the elastic modulus of polyvinyl alcohol sponge using different stress-strain definitions’, *Biomedizinische Technik*, 59(5), pp. 439–446. doi: 10.1515/bmt-2013-0110.

Koshizuka, S. and Oka, Y. (1996) ‘Moving particle semi implicit method for fragmentation of incompressible fluid’, *Nuclear Science and Engineering*, 123(3), pp. 421–434.

Johnson, K. L. *Contact Mechanics*. Cambridge: Cambridge University Press, 1985

Lee, E. W. M., Yu, K. F. and Xu, L. (2013) ‘Application of computational fluid dynamics for prediction of clogging locations in building drainage system.’, *International Symposium Cib W062 on Water Supply and Drainage for Buildings*, (1), pp. 65–75.