

# 6º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



## TÍTULO DO TRABALHO:

Simulação Fluidodinâmica do Vazamento de Água em uma Seção de Duto para Aplicações na Indústria de Petróleo e Gás

## AUTORES:

Flávia Morini Garcia; Jeferson Giaretton; Marinho Bastos Quadri; Ariovaldo Bolzan

## INSTITUIÇÃO:

Universidade Federal de Santa Catarina

*Este Trabalho foi preparado para apresentação no 6º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás- 6º PDPETRO, realizado pela Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás-ABPG, no período de 09 a 13 de outubro de 2011, em Florianópolis-SC. Esse Trabalho foi selecionado pelo Comitê Científico do evento para apresentação, seguindo as informações contidas no documento submetido pelo(s) autor(es). O conteúdo do Trabalho, como apresentado, não foi revisado pela ABPG. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões da Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás. O(s) autor(es) tem conhecimento e aprovação de que este Trabalho seja publicado nos Anais do 6ºPDPETRO.*

## **Simulação Fluidodinâmica do Vazamento de Água em uma Seção de Duto para Aplicações na Indústria de Petróleo e Gás**

### **Abstract**

This work describes the dynamic behavior of a pipe section under operation for water leak events through fluid dynamics simulations using commercial software. The pipe section has 3 dimensions geometry with two meter length and a 4 mm diameter leak. The variables of interest were: the speed field and the water volume fraction. The simulations results showed interesting because is possible to observe over time specific variables that governing the water leak phenomenon. These variables can enable to know the most appropriate characteristics of sensors used in monitoring of leaks in pipe networks. Thus, this work wants to contribute for demand of oil and gas industry in the environmental maintenance of its operations.

### **Introdução**

Em muitos sistemas de distribuição de fluidos um significativo volume dos mesmos é perdido devido a vazamentos em redes de dutos. Para reduzir estas perdas muitos sistemas de detecção e localização de vazamentos têm sido desenvolvidos em muitos países. Desta forma, o conhecimento prévio de todas as variáveis envolvidas no fenômeno de vazamento é crucial para o desenvolvimento de uma técnica eficaz e segura. Entretanto, na prática muitas dessas variáveis não são facilmente mensuráveis e a fluidodinâmica computacional surge como uma ferramenta que auxilia no conhecimento dessas variáveis.

Muitos trabalhos apresentados na literatura tratam da problemática de vazamento em redes de dutos. Hunaidi e Chu (1999) investigaram características acústicas de sinais de vazamento de água para variados vazamentos simulados em um duto de PVC de 150 mm de diâmetro e 200 m de comprimento. A análise incluiu a frequência contida nos sinais de vibração em função do tipo de vazamento, vazão, pressão, entre outros. Os resultados obtidos pelos autores podem servir de parâmetro para selecionar a instrumentação apropriada e os procedimentos de medida na detecção e localização de vazamentos de água em dutos.

Muggleton e Brennan (2004) investigaram, com um duto de plástico submerso em um tanque de água, a propagação acústica em baixa frequência e as características de atenuação do sinal no duto através de modelo teórico. Eles observaram que a atenuação para um duto submerso é relativamente maior do que para um duto similar no vácuo. Além disso, segundo os autores a atenuação foi menor quando comparada com a atenuação obtida quando o duto foi enterrado no solo.

Abhulimen e Susu (2004) propuseram um modelo otimizado para detectar vazamentos em redes de dutos transportando líquidos. O modelo utilizava o conceito baseado no critério de estabilidade de Liapunov. O modelo de escoamento foi realizado a partir de um típico sistema de duto e a inclusão de fator de fuga  $k_L$  no modelo de escoamento forneceu uma indicação do grau do desvio relativo do equilíbrio ou qualquer situação onde não ocorria um vazamento. Um conjunto de parâmetros de velocidade e perfis de pressão foi gerado e, posteriormente, validado utilizando dados da indústria. Um vazamento era detectado quando qualquer um dos autovalores era menor que -1, enquanto que uma variação qualquer no duto era indicada quando qualquer um dos autovalores era maior que 1. Os resultados obtidos pelos autores mostram que os desvios de pressão é um parâmetro mais sensível para detecção de vazamento do que desvios de volume.

Jiménez *et al.* (2010) analisaram a relação das formas das falhas em tubos com os mecanismos que geram a intrusão (pressão negativa na tubulação). Foram analisados os fluxos de água com base na pressão que gerou a intrusão no tubo através da experimentação e modelagem em 3 dimensões da fluidodinâmica. O objetivo dos autores era identificar por meio de modelos experimentais e com um modelo numérico a relação potencial entre o fluxo e a pressão de intrusão na zona de falha, para representar o evento de uma forma numérica.

Na literatura não existem muitos trabalhos, utilizando a fluidodinâmica, que tratem da temática de vazamento levando em conta o caráter multifásico e estrutural desses escoamentos. Este trabalho tem como objetivo analisar o escoamento de duas fases através da simulação fluidodinâmica de um vazamento de água em uma seção de duto baseada em uma bancada experimental utilizada no trabalho de Garcia (2010) que realizou testes reais de vazamento. Conhecendo o comportamento do escoamento e todas as variáveis que governam o fenômeno é possível projetar sensores e sistemas de medição mais adequados para a monitoração de redes de tubulações da indústria de petróleo e gás.

## Metodologia

**Definição da geometria** – A geometria definida para as simulações foi baseada em seção de duto de aço com 2m de comprimento e o orifício de vazamento tem 4 mm de diâmetro. A Figura 1 indica a geometria em 3 dimensões e a Figura 2 indica o detalhe do orifício de vazamento de 4mm de diâmetro. A geometria foi gerada utilizando o software comercial COMSOL Multiphysics 4.0a<sup>®</sup>. A seção de duto tinha uma entrada em uma das extremidades e a outra extremidade era fechada. Foi construído também um volume cilíndrico para observação do jato de vazamento depois do orifício de vazamento.

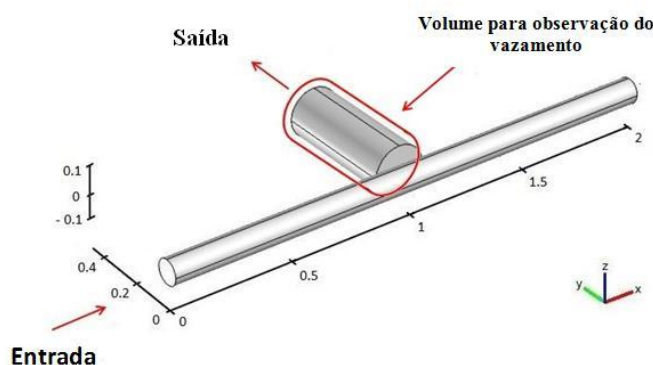


Figura 1. Geometria da seção de duto

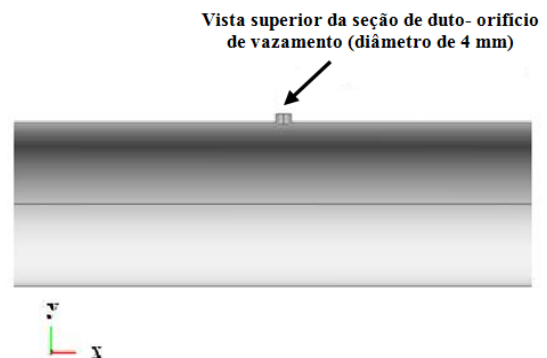


Figura 2. Detalhe do orifício de vazamento de 4 mm de diâmetro

A malha da geometria foi definida de forma a atender as necessidades da simulação sem prolongar o tempo de computação. A Figura 3 indica a malha utilizada na simulação. A malha possuía 21376 elementos tetraédricos.

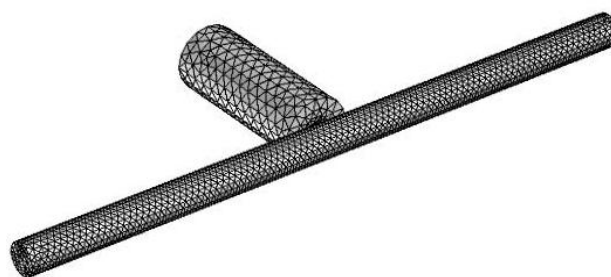


Figura 3. Malha utilizada nas simulações

Desta forma, com uma malha otimizada foi possível realizar as simulações propostas.

**Definição das condições iniciais e de contorno** - Para simular um fluxo de fluido na seção de duto foi criada uma entrada e uma saída no volume de observação como mostra a Figura 4. Inicialmente a seção de duto estava preenchida completamente com água à pressão de  $10,13 \times 10^5$  Pa e o volume de observação continha ar à pressão de 0 Pa.



Figura 4. Contornos definidos

**Equações governantes** - Para modelar o fluxo de dois fluidos diferentes, onde a posição exata da interface é de interesse é possível utilizar a interface de fluxo dessas duas fases no software comercial utilizado. Esta interface controla a interface fluido - fluido utilizando um método de campo de fase. Este modelo leva em consideração as diferenças na densidade dos dois fluidos e viscosidades e inclui o efeito da tensão superficial. A interface de fluxo de duas fases, por *default* utiliza a formulação de fluidos incompressíveis das equações de Navier-Stokes apresentadas pelas Equações 1 e 2:

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \nabla \cdot [-p\mathbf{I} + \mu(\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T)] + \mathbf{F}_g + \mathbf{F}_{st} + \mathbf{F}_{ext} + \mathbf{F} \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (2)$$

Onde  $\mathbf{u}$  é a velocidade (m/s),  $\rho$  é a densidade ( $\text{kg/m}^3$ ),  $p$  é a pressão (Pa),  $\mathbf{I}$  é a matriz identidade,  $\mu$  é a viscosidade dinâmica (Pa.s),  $T$  é a temperatura (K),  $\mathbf{F}_g$  é a força da gravidade ( $\text{N/m}^3$ ),  $\mathbf{F}_{st}$  é a força de tensão superficial na interface dos dois fluidos ( $\text{N/m}^3$ ),  $\mathbf{F}_{ext}$  é a força proveniente da energia livre externa ( $\text{N/m}^3$ ) e  $\mathbf{F}$  é o campo vetorial de força ( $\text{N/m}^3$ ).

Para controlar a interface do escoamento foi utilizando o Método Campo de Fases conforme as Equações (3-4):

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \phi = \nabla \cdot \left( \frac{\gamma \lambda}{\varepsilon^2} \nabla \psi \right) \quad (3)$$

$$\psi = -\nabla \cdot \varepsilon^2 \nabla \phi + (\phi^2 - 1)\phi + \left( \frac{\varepsilon^2}{\lambda} \right) \frac{\partial f_{ext}}{\partial \phi} \quad (4)$$

Onde  $\phi$  é a fração volumétrica ( $\text{m}^3/\text{m}^3$ ),  $\gamma$  é a mobilidade ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}/\text{kg}$ ),  $\lambda$  densidade da energia de agitação (N),  $\varepsilon$  é a largura do capilar na interface dos fluidos (m),  $\psi$  variável de condição inicial para simulação em regime transiente,  $f_{ext}$  energia livre externa ( $\text{J}/\text{m}^3$ ).

A fração de volumétrica do fluido 2 foi computada conforme a Equação (5):

$$V_f = \min(\max([(1 + \phi)/2], 0), 1) \quad (5)$$

Os operadores *min* e *max* foram utilizados para limitar a fração volumétrica na faixa de 0 a 1. A densidade e a viscosidade dinâmica foram calculadas utilizando as Equações (6-7), respectivamente:

$$\rho = \rho_1 + (\rho_2 - \rho_1)V_f \quad (6)$$

$$\mu = \mu_1 + (\mu_2 - \mu_1)V_f \quad (7)$$

Onde  $\rho_1$  e  $\rho_2$  são as densidades e  $\mu_1$  e  $\mu_2$  são as viscosidades dinâmicas do fluido 1 e do fluido 2, respectivamente.

**Procedimentos computacionais** - O modelo foi simulado com o software COMSOL Multiphysics® 4.0a que têm facilidades para a modelagem e também para o processamento computacional das simulações. O COMSOL Multiphysics é um poderoso ambiente interativo para modelagem e resolução de todos os tipos de problemas científicos e de engenharia baseados em equações diferenciais parciais. Assim, o software utiliza o método numérico dos elementos finitos. A *backward differentiation formula* (BDF) foi o método utilizado para resolver o problema dependente do tempo. A convergência para cada simulação no estado transiente levou em média 10 minutos.

## Resultados e Discussão

Inicialmente, investigou-se se na prática o vazamento de água com o orifício circular de 4 mm apresentava caráter de escoamento laminar. Desta forma, realizou-se um teste de vazamento com a bancada experimental e filmou-se o instante inicial de vazamento. A Figura 5 detalha a seção de duto utilizada para o teste de vazamento.



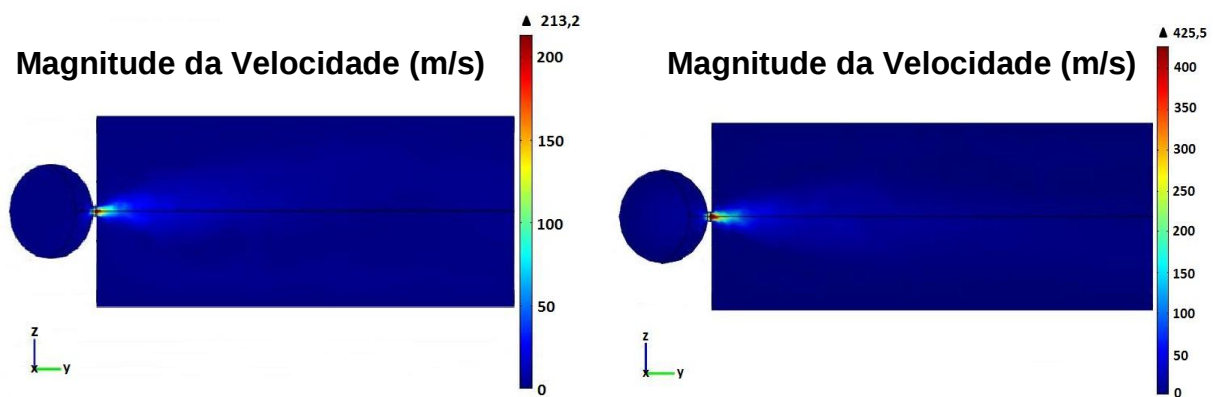
**Figura 5. Seção de duto**

A seção de duto é de aço inox com 2m de comprimento e 10 cm de diâmetro externo. A seção de duto foi preenchida completamente com água, abriu-se a válvula de entrada de ar, acionou-se o início do vazamento e a filmagem. A Figura 6 mostra o momento inicial do vazamento de água através de uma vista superior da seção de duto.



**Figura 6. Detalhe do jato de água no momento inicial do vazamento**

Foi possível observar que, para esta situação utilizando um furo circular de 4 mm de diâmetro, o vazamento tem um aspecto visual laminar, sendo que esse resultado possibilitou a utilização de um modelo laminar para o escoamento multifásico. Para entender o comportamento do campo de magnitude da velocidade exatamente no furo de vazamento, foram analisados os perfis de magnitude da velocidade em um plano central da seção de duto com uma velocidade de entrada de 2 e 10 m/s no tempo de 1s de vazamento de água. A Figura 7 (a e b) indicam os perfis de velocidade no tempo de 1s para as velocidades na entrada de 2 e 10 m/s, respectivamente.

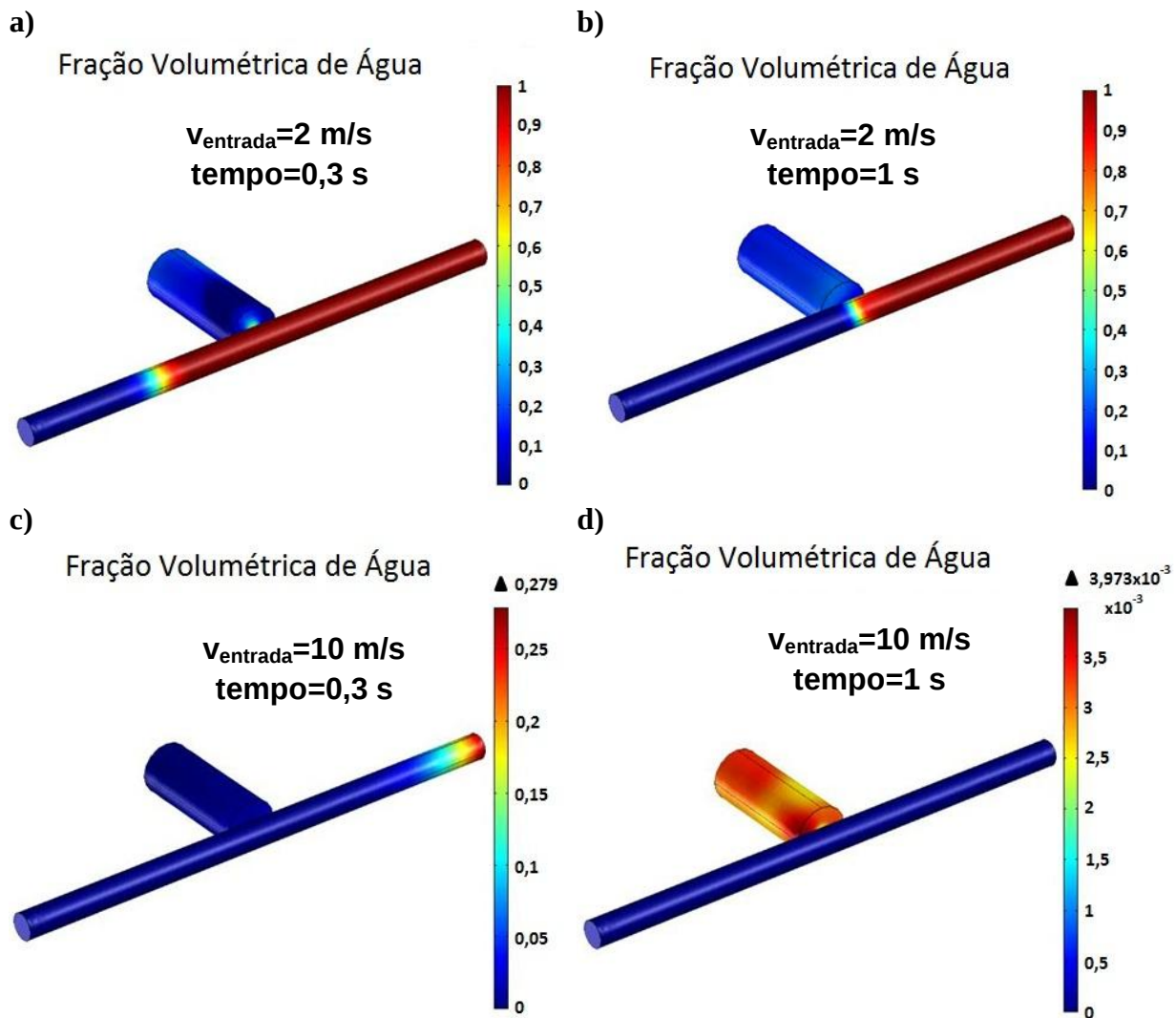


**Figura 7. (a e b) Magnitude da velocidade (m/s) para a velocidade de entrada na seção de duto de 2 e 10 m/s, respectivamente.**

Foi possível observar o mesmo aspecto para os dois espectros no furo de vazamento, pois é exatamente nessa região que ocorrem os maiores valores de velocidade chegando a 425,5 m/s para a simulação realizada utilizando a velocidade de entrada de 10 m/s. Desta forma, fica evidente o caráter supersônico do vazamento de água no orifício circular de 4 mm e a importância de considerar na modelagem equações de escoamento supersônico. Por outro lado, essas altas velocidades só foram observadas exatamente na região do furo e logo após o vazamento elas diminuem consideravelmente. Entretanto, na prática medir a velocidade dentro do furo de vazamento (4 mm), ainda levando em consideração o diâmetro do mesmo, seria inviável, pois exigiria sensores muito específicos. Portanto, a simulação fluidodinâmica é uma ferramenta que possibilita uma análise destes parâmetros detalhadamente sem elevar os custos operacionais.

Para observar a evolução do escoamento de água na seção de duto ao longo do tempo com as diferentes velocidades na entrada foram feitos gráficos para as duas situações simuladas (2 e 10 m/s na entrada). A Figura 8 (a e b) mostra a fração volumétrica de água no tempo de 0,3 e 1 s, respectivamente, ao longo da seção de duto utilizando uma velocidade na entrada de 2 m/s. A Figura 8

(c e d) mostra a fração volumétrica da água nos mesmos tempos citados, mas com uma velocidade na entrada de 10 m/s.



**Figura 8. (a e b) Fração volumétrica da água ao longo da seção de duto nos tempos de 0,3 e 1 s para uma velocidade de entrada de 2 m/s; (c e d) Fração volumétrica da água ao longo da seção de duto nos tempos de 0,3 e 1 s para uma velocidade de entrada de 10 m/s**

Como pode ser observado o valor da velocidade na entrada tem influência crucial para o escoamento da água ao longo do duto e no furo de vazamento. Para a simulação utilizando como velocidade na entrada 2 m/s pode-se observar que no tempo de 0,3 s a fração de água ao longo da seção de duto é maior do que em 1 s, como era de se esperar. Esse resultado é bastante importante, pois nos trabalhos experimentais desenvolvidos pelos autores, na maioria das vezes, as amostragens do sinal de vibração na seção de duto são realizadas apenas para o primeiro segundo após o acionamento do vazamento.

## Conclusões

Através dos estudos realizados foi possível identificar características relevantes do fenômeno como a natureza supersônica do escoamento através das altas velocidades exatamente no furo de vazamento. Desta forma, fica claro que o modelo precisa ser reavaliado para a continuação da pesquisa.

A pesquisa utilizando a fluidodinâmica para estudar vazamentos de água ainda está na fase inicial e na sequência do trabalho será necessária uma análise do campo de velocidades para furos com maior diâmetro de vazamento e observar se as altas velocidades ainda serão as observadas. Além disso, a

definição da geometria e da malha é de fundamental importância para o processamento e certeza dos resultados obtidos. Uma malha quando não refinada o suficiente gera não convergência e resultados obtidos. Uma malha quando não refinada o suficiente gera não convergência e resultados errados. A simulação fluidodinâmica mostra-se como uma ferramenta importante, pois cria maiores possibilidades e cálculos de parâmetros envolvidos no fenômeno de vazamento.

### **Agradecimentos**

Os autores agradecem o apoio financeiro da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis - ANP, e da Financiadora de Estudos e Projetos - FINEP, por meio do Programa de Recursos Humanos da ANP para o Setor Petróleo e Gás PRH-34 ANP/MCT.

### **Referências Bibliográficas**

ABHULIMEN, K. E.; SUSU, A. A. Liquid pipeline leak detection system: model development and numerical simulation *Chemical Engineering Journal*, n. 97, p. 47-67, 2004.

GARCIA, F. M. Caracterização vibroacústica de vazamentos a partir de uma seção de duto para aplicações na indústria de petróleo e gás. Dissertação de mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, 2010.

HUNAI, O., CHU, W. T. Acoustical Characteristics of Leak Signals in Plastic Water Distribution Pipes. *Applied Acoustics*, v. 58, p. 235-254, 1999.

JIMÉNEZ, P. A. L., RODRÍGUEZ, J. M.; MARES, F. J. G.; MIQUEL, V. S. F. 3D computational model of external intrusion in a pipe across defects. In: *2010 International Congress on Environmental Modelling and Software*, Canadá, 2010.

MUGGLETON, J. M.; BRENNAN, M. J. Leak Noise Propagation and Attenuation in Submerged Plastic Water Pipes. *Journal of Sound and Vibration*, n. 278, p. 527-537, 2004.