

8º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

FLUIDODINÂMICA DE VEÍCULOS AUTÔNOMOS SUBMARINOS: MODELAGEM E SIMULAÇÃO

AUTORES:

Thaylane da Rocha Bezerra¹
Michele Agra de Lemos Martins¹
Tony Herbert Freire de Andrade²

INSTITUIÇÃO:

Universidade Federal de Alagoas¹

Universidade Federal de Campina Grande²

Este Trabalho foi preparado para apresentação no 8º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás - 8º PDPETRO, realizado pela Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás - ABPG, no período de 20 a 22 de outubro de 2015, em Curitiba/PR. 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 8º PDPETRO.

FLUIDODINÂMICA DE VEÍCULOS AUTÔNOMOS SUBMARINOS: MODELAGEM E SIMULAÇÃO

Abstract

Underwater activities in Brazil are increasingly intense, either for the exploitation of marine resources such as oil extract, biological research, environmental studies, among others. Therefore, the search for proper equipment that can assist in these activities is becoming indispensable. Among these devices are the Autonomous Underwater Vehicles, also known as AUV. AUVs are robots that operate underwater without physical communication with the land and without the need for human operator. Its technological and economic potential is appreciable, particularly in activities such as search and exploration of oil and natural gas in deep water. Based on that scenario, and knowing that the study and development of these vehicles come with work associated with the large areas of modeling, identification and control of marine systems, this work aims at the numerical studying of fluid dynamics of AUVs. In this work, the numerical study was developed considering a single fluid flow analysis around a geometric configuration of an AUV hull with the aid of Computational Fluid Dynamics. The velocity and pressure fields results are presented and analyzed. ANSYS CFX® tool was used for the numerical study of the fluid dynamics of the AUV.

Introdução

Os Veículos Autônomos Submarinos (AUVs) constituem parte de um largo grupo de sistemas submarinos conhecidos como Veículos Submarinos não Tripulados, do inglês, *Unmanned Underwater Vehicles*, mais conhecidos como UUV. Os AUVs são robôs que operam debaixo d'água sem comunicação física com a terra e sem a necessidade de operador humano. Este equipamento submarino opera através de um sistema de propulsão e é controlado e pilotado por um computador de bordo, sendo manobrável em três dimensões.

A indústria de petróleo e gás é a maior usuária de veículos submarinos. Estes ajudam na perfuração, instalação e construção de estruturas submersas. Eles são primordiais em reservas que estão situadas a profundidades de 2000m ou mais, logo inacessíveis para mergulhadores (Santana, 2010). Desta forma, diante da descoberta de petróleo na chamada província do pré-sal no Brasil, o estudo, desenvolvimento e utilização desses veículos se torna fundamental.

O comportamento de fluxo de fluido viscoso é descrito pelas equações de Navier-Stokes, as quais são formas particulares das Leis de Newton, complementadas por uma equação que descreve a conservação de massa, submetido às condições de contorno prevalentes. A partir destas pode-se determinar os campos de velocidade e pressão em um escoamento.

Somente em casos mais simples, as equações de Navier-Stokes podem ser resolvidas analiticamente, visto que estas são equações diferenciais parciais não lineares em praticamente todas as situações reais, o que dificulta a obtenção da solução. Além disto, as condições de contorno e iniciais tornam a maioria dos problemas difíceis ou até mesmo impossíveis de serem resolvidos. Desta forma, para tais situações reais, a solução dessas equações é obtida por aproximação através da utilização de computadores.

Para alcançar a solução destas equações através de métodos numéricos é necessário converter o domínio de fluxo contínuo em um domínio discreto através de uma malha numérica. As equações diferenciais que regem o fluxo são então transformadas, usando esquemas numéricos de discretização, em conjuntos de equações algébricas. Em seguida, as equações algébricas são resolvidas, usando métodos lineares, em um computador, para se obter os valores discretos da velocidade e da pressão nos nós da malha. A coleção de técnicas teóricas, numéricas e computacionais que facilitam este processo é chamada de Fluidodinâmica Computacional ou CFD, do inglês *Computational Fluid Dynamics* (Sousa et al., 2014).

A técnica CFD é amplamente utilizada, uma vez que reduz os custos e o tempo na obtenção de dados quando comparada aos testes experimentais. Portanto, este trabalho tem como objetivo avaliar o fluxo de fluido ao redor do casco de um AUV, através do *software* ANSYS CFX® release 12.1.

Metodologia

- A geometria do casco do AUV

O casco do AUV pode ser dividido em três seções distintas, a saber, nariz ou popa, seção cilíndrica do meio do corpo e cauda ou proa. A Figura 1 mostra um exemplo de AUV e suas seções.

Figura 1 - AUV Autosub6000. (a) Nariz ou popa; (b) Seção cilíndrica do meio do corpo; (c) Cauda ou proa.



Fonte: Adaptado de McPhail (2009)

O casco do AUV utilizado neste trabalho é do tipo torpedo (corpo cilíndrico com uma grande relação entre o comprimento e o diâmetro), cuja utilização é generalizada por todos os principais fabricantes de AUVs.

Para modelar os perfis da proa e popa foram utilizadas as equações de Myring, recorrente em diversos trabalhos como Barros *et al.* (2008), Joung (2009) e Sousa *et al.* (2014). Estas são equações teóricas que descrevem as curvas da proa e popa do corpo do torpedo e que produz o menor coeficiente de arraste possível. As formas curvas das seções da proa e da popa são determinados a partir das Equações 1 e 2, respectivamente.

➤ Proa:

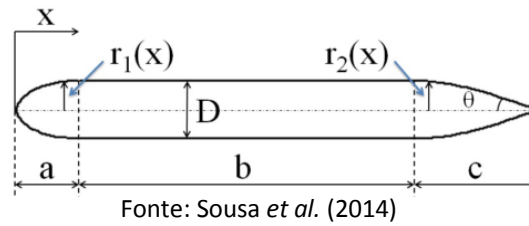
$$r_1(x) = \frac{1}{2}D \left[1 - \left(\frac{x-a}{a} \right)^2 \right]^n \quad (1)$$

➤ Popa:

$$r_2(x) = \frac{1}{2}D - \left[\frac{3D}{2c^2} - \frac{tg\theta}{c} \right] (x - a - b)^2 + \left[\frac{D}{c^3} - \frac{tg\theta}{c^2} \right] (x - a - b)^3 \quad (2)$$

Todos os parâmetros das Equações 1 e 2, com exceção do parâmetro n , são geométricos. A Figura 2 mostra todos os parâmetros apresentados nas equações supracitadas.

Figura 2 - Esquema do casco do AUV e parâmetros geométricos da equação de Myring.



- O domínio físico e a malha numérica

Os parâmetros considerados neste trabalho foram os mesmos utilizados por Sousa *et al.* (2014), que foram baseados nas dimensões dos AUVs existentes no mercado. Os parâmetros estão mostrados na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros geométricos do AUV.

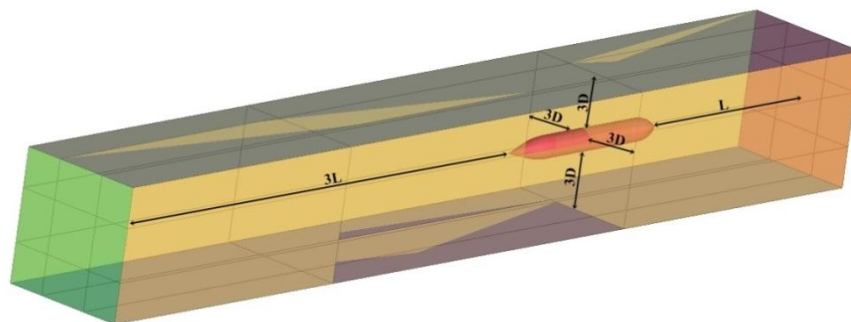
Parâmetro	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>D</i>
Valor (mm)	215	1155	430	200

Fonte: Autores (2015)

Referente aos valores de n e θ , foram utilizados, respectivamente, 1 e 15° . Contudo, vale ressaltar que posteriormente será realizado um estudo dos parâmetros n e θ em relação à fluidodinâmica do AUV. Será avaliada a variação dos valores de n e θ , que podem variar de 1 a 4 e 15° a 30° respectivamente, a fim de verificar para qual valor obtém-se uma condição ótima, ou seja, aquela que oferecerá o menor coeficiente de arraste possível.

O domínio do problema está representado na Figura 3 como função do diâmetro máximo do casco do torpedo, $D = 200\text{mm}$, e o seu comprimento, $L = 1800\text{mm}$.

Figura 3 - Domínio físico do problema



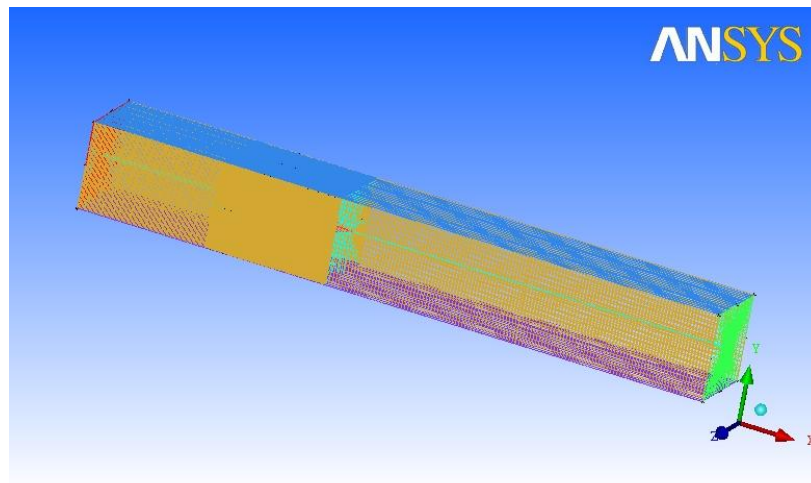
Foram geradas três malhas numéricas através da ferramenta ICEM CFD® *release* 12.1, todas do tipo estruturada, sendo diferenciadas apenas por questão de refinamento. A Figura 4 exhibe a malha mais refinada, sendo esta composta por 599832 elementos e 617940 nós. A Tabela 2 mostra a quantidade de elementos e nós de cada malha.

Tabela 2 - Quantidade de elementos e nós de cada malha

Malha	1	2	3
Elementos	351432	434232	599832
Nós	369390	452240	617940

Fonte: Autores (2015)

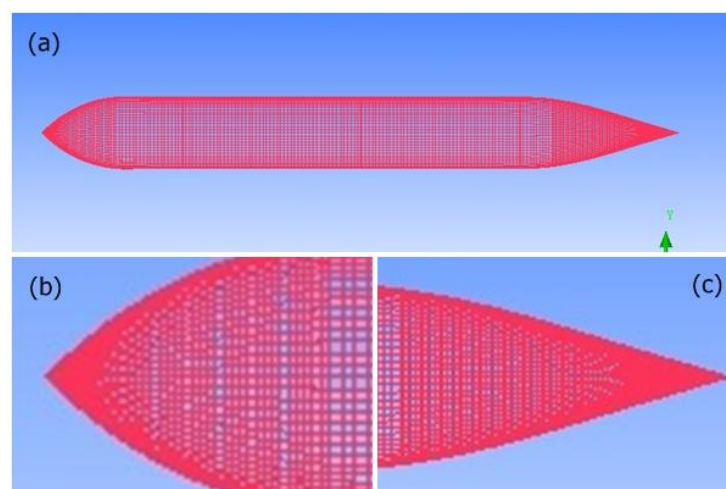
Figura 4 - Malha numérica



Fonte: Autores (2015)

A Figura 5 exibe detalhes da malha na região do casco do veículo, enfatizando as regiões da proa e popa que tiveram um maior refinamento por serem as regiões de maiores interesse nesse estudo, tendo como objetivo avaliar o efeito da pressão nessas regiões.

Figura 5 - Detalhes da malha na região do casco do veículo. (a) Casco do torpedo; (b) Região da proa; (c) Região da popa



Fonte: Autores (2015)

- Modelagem matemática:

Para analisar a fluidodinâmica do AUV foi considerado escoamento turbulento, regime permanente, incompressível e isotérmico.

As equações governantes utilizadas foram as seguintes:

- Conservação de massa:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V) = 0 \quad (3)$$

- Conservação de momento:

$$\frac{\partial(\rho V)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V \otimes V) - \nabla \cdot (\mu_{eff} \nabla V) = -\nabla p' + \nabla \cdot (\mu_{eff} \nabla V)^T + \rho g \quad (4)$$

Onde ρ é a densidade, t o tempo, $V = (u, v, w)$ representa o vetor velocidade, g a gravidade e μ_{eff} é a viscosidade efetiva.

O modelo de turbulência utilizado foi o k-Epsilon ou $k - \varepsilon$. Este modelo é amplamente utilizado em diversos estudos de escoamento turbulentos representando muito bem os efeitos de turbulência (ANSYS, 2012).

O modelo $k - \varepsilon$ é regido por duas equações, equação de transporte para a energia cinética turbulenta, k , e a taxa de dissipação turbulenta, ε :

- Energia cinética turbulenta:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V k) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho \varepsilon \quad (5)$$

- Taxa de dissipação turbulenta:

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V \varepsilon) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} P_\varepsilon) \quad (6)$$

Onde $C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$, σ_k e σ_ε são constantes. P_k é a produção de turbulência devido á forças viscosas e de flutuabilidade.

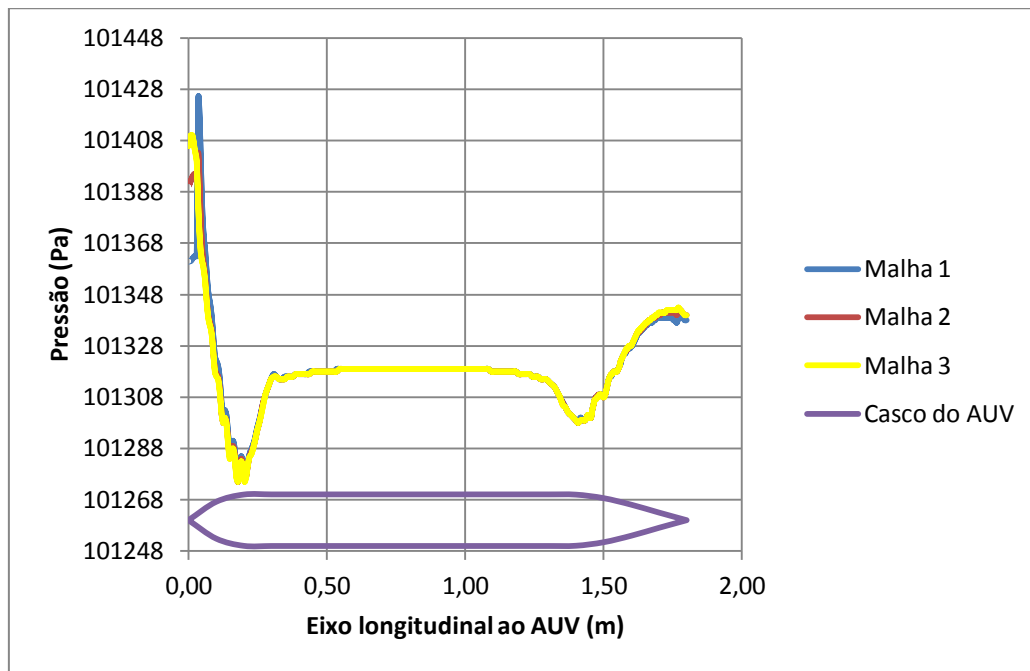
Resultados e Discussão

O Gráfico 1 exibe os resultados da pressão no casco do AUV obtidos para cada malha. Para uma melhor visualização da pressão em relação à localização no casco do AUV, foi plotado, no mesmo gráfico, a curva que descreve o torpedo. É possível verificar que a simulação realizada apresentou resultados satisfatórios para a pressão, visto que o resultado obtido se aproxima do esperado, pois a pressão máxima acontece na proa do veículo, conforme mostra o gráfico abaixo.

Observa-se que para a Malha 1 o pico de pressão não ocorre no início da proa (posição 0,00m), o que é o esperado. Por meio do refinamento da malha foi possível observar melhoras significativas em relação à pressão nessa posição. O Gráfico 1 mostra que a Malha 3, a mais refinada de todas as que foram geradas, foi aquela que forneceu melhores resultados.

Vale destacar ainda que os valores obtidos para pressão na proa e popa do torpedo foram maiores do que na seção cilíndrica do meio, conforme esperado, já que nessas duas primeiras seções a área é menor e consequentemente a pressão é maior.

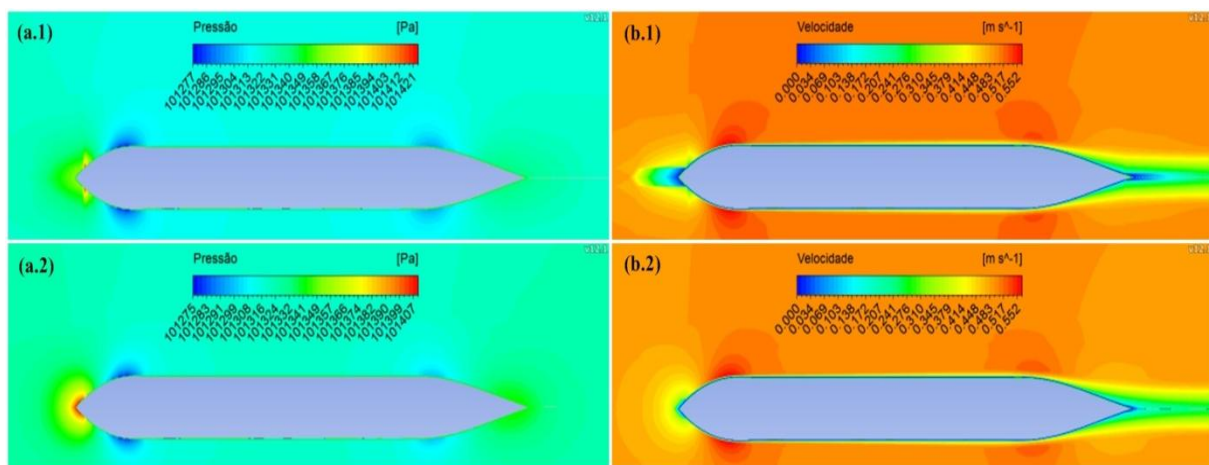
Gráfico 1 - Pressão no casco do AUV.



Fonte: Autores (2015)

A Figura 6 exibe as comparações entre os resultados obtidos através das Malhas 1 e 3 para os valores de pressão e velocidade. Observa-se que os resultados obtidos para as duas variáveis analisadas melhoraram significativamente através do refinamento da malha na região da polpa, da proa, do corpo e de todo perímetro circular do casco do AUV. Percebe-se que o modelo foi capaz de representar melhor os efeitos da pressão e o campo de velocidade nestas regiões. Os campos de pressão e velocidade apresentaram mudanças significativas, principalmente nas seções da proa e popa.

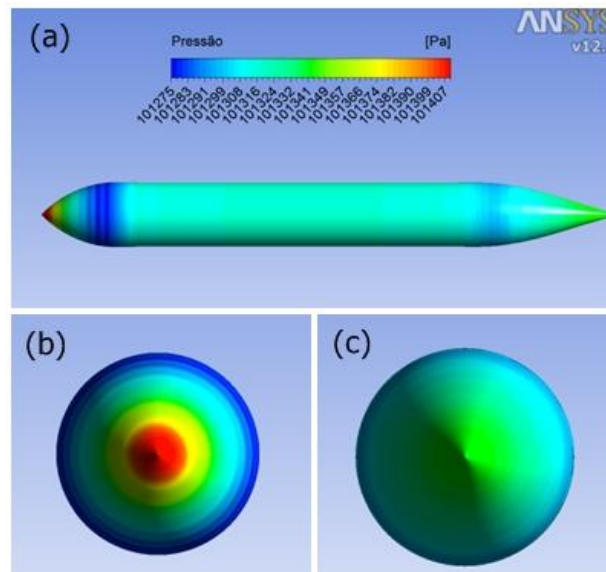
Figura 6 - Comparação entre os resultados obtidos através das Malhas 1 e 3. (a.1) Pressão – Malha 1; (a.2) Pressão – Malha 3; (b.1) Velocidade – Malha 1; (b.2) Velocidade – Malha 3



Fonte: Autores (2015)

A Figura 7 ilustra, em maiores detalhes, a pressão no casco do AUV obtida através da Malha 3, destacando-a nas regiões da proa e popa.

Figura 7 - Pressão no casco do AUV (a), proa (b) e popa (c)



Fonte: Autores (2015)

Conclusões

Os resultados apresentados são satisfatórios, correspondendo com a realidade. As pressões na proa e popa do veículo foram mais elevadas que na seção cilíndrica do meio do torpedo, como era esperado. O refinamento da malha foi de extrema importância para a obtenção de melhores resultados, tanto para os resultados de pressão quanto velocidade.

Agradecimentos

Agradecimentos à Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP); ao Programa de Formação de Recursos Humanos para Indústria de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (PRH-40) e ao Laboratório de Computação e Visualização Científica (LCCV) pelo estímulo e apoio na realização deste trabalho.

Referências Bibliográficas

ANSYS. CFX-Theory Manual. 2009.

BARROS, E. A.; DANTAS, J. L. D.; PASCOAL, A. M.; DE SÁ, E. **Investigation of Normal Force and Moment Coefficients for an AUV at Nonlinear Angle of Attack and Sideslip Range**. IEEE Journal of Oceanic Engineering, v. 33, n. 4, p. 538-549, 2008.

JOUNG, T. **A Study on the Design Optimization of an AUV by Using Computational Fluid Dynamic Analysis**. Proceedings of the Nineteenth, International Offshore and Polar Engineering Conference, p. 696-702, Osaka, Japão, 2009.

SOUSA, J.V.N.; MACÊDO, A. R. L.; AMORIM JUNIOR, W. F.; LIMA, A. G. B. **Numerical Analysis of Turbulent Fluid Flow and Drag Coefficient for Optimizing the AUV Hull Design**. Open Journal of Fluid Dynamics, 4, p. 263-277, 2014.

SANTANA, A. V. **Estudo do Comportamento Dinâmico Aplicável à Veículos de Localização, Investigação e Resgate Submarino**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, 140 p., Rio de Janeiro, 2010.