MODELAGEM COMPUTACIONAL DA DISTRIBUIÇÃO DA PRESSÃO EM CÁPSULAS DE DUTOVIAS

Gabriel C. Nascimento[1]; José C. C. Amorim [2]; Carlos A. B. de Vasconcellos[2] & Marcelo de M. Reis[2]*

O transporte encapsulado em dutovias é uma alternativa inovadora que consiste da propulsão de cápsulas no interior de dutos, através do escoamento de ar ou água, possibilitando o transporte de diversos tipos de carga aliado às diversas vantagens das dutovias, quando comparada com os demais modais. No presente trabalho, foi realizada a modelagem computacional do escoamento da água entre o duto e a cápsula com o intuito de se prever a distribuição das pressões resultantes, que é o principal fator responsável pela força de arrasto exercida na cápsula. Os resultados obtidos foram comparados com dados experimentais disponíveis na literatura, comprovando a confiabilidade do modelo e a sua aplicabilidade para futuros estudos desta tecnologia.

Palavras-Chave – Transporte encapsulado, CFD, HCP.

COMPUTATIONAL MODELING OF PRESSURE DISTRIBUTION IN ENCAPSULATED PIPELINES

The encapsulated pipelines is an innovative alternative consisting of capsules inside the pipeline propelled by the flow of air or water, allowing the transport of various types of load coupled of various advantages of pipelines when compared to other transportation modes. In this work, was performed the computational modeling of the flow of water between the duct and the capsule in order to predict the distribution of pressures, which is the main factor responsible for the drag force on the capsule. The results were compared with experimental data available in the literature, proving the reliability of the model and its applicability to future studies of this technology.

Keywords – Encapsulated pipeline, CFD, HCP.

[1] Universidade Federal Fluminense.
[2] Instituto Militar de Engenharia.

INTRODUÇÃO

Transporte encapsulado em dutos

Em diversos aspectos, as dutovias possuem os melhores índices entre todos modais de transporte, sendo eles: a confiabilidade; a frequência; e o baixo impacto ambiental. A ocorrência anual de acidentes na operação de dutovias é muitas vezes singular, tornando-o o meio de transporte mais seguro e confiável. Sua indiferença quanto às condições climáticas e a natureza de seu funcionamento, que exige raras interrupções, permitem que seja utilizado 24 horas por dia e 7 dias por semana, resultando numa frequência de, praticamente, 100% do tempo. Por último, na conceituação de um aspecto que vem cada vez mais ganhando importância na análise dos meios de transporte, ressalta-se seu baixo impacto ambiental, que se deve ao fato de sua instalação requerer uma insignificante alteração física do meio ambiente e sua operação depender fundamentalmente de bombas elétricas, resultando na maior eficiência energética entre todos modais.

Estes fatores positivos geram motivação para busca de métodos que permitam o aumento da variabilidade em tipos de cargas que possam ser transportadas, o que tornariam este modal bastante atrativo e até mesmo uma solução para diminuição da sobrecarga na infraestrutura de transportes do país. Dentro deste contexto, é enfatizado o transporte encapsulado em dutovias, que consiste basicamente, em se propelir cápsulas pelo fluxo de um fluido através do duto. Tais cápsulas podem ser a própria carga útil, quando é possível moldá-la em um formato que se adeque ao interior do duto (e.g. cilíndrico ou esférico) e o material constitutivo da carga resista à interação com o fluido e eventuais choques com a superfície interna. Caso contrário, as cápsulas serão contêineres que em seu interior transportam a carga útil, generalizando-se a natureza do que se deseja transportar. De acordo com o tipo de fluído utilizado para o impulsionamento, os dutos são classificas como HCP (Hydraulic Capsule Pipeline), quando se trata de líquido (água), ou PCP (Pneumatic Capsule Pipeline), se o fluido for gasoso (ar).

Hydraulic Capsule Pipeline (HCP)

A primeira proposta de HCP surgiu durante a 2ª Guerra Mundial por Jeffrey Pyke para transportar materiais bélicos da China para Burma (Lumpe, 1959), mas devido à falta de tecnologia desenvolvida não foi implantado naquela época. A ideia resurgiu no Canadá em 1959 e entre as décadas de 70 e 80 também se iniciaram pesquisas sobre o assunto nos EUA, Japão e outros países (ASCE, 1998).

A utilização mais conhecida de HCP são os CLP (Coal Log Pipeline). CLP são capsulas formadas por carvão compactado em formato cilíndrico, que se aliando à sua resistência à água, dispensam a necessidade de uma cápsula contêiner. Desta forma, não é preciso retornar cápsulas vazias à fonte do sistema o que, praticamente, duplica a capacidade de transporte.

Figura 1 – CLP's (esq.) e máquina de compactação das cápsulas (dir.). (Liu, 2006)

Desenvolvido e amplamente pesquisado pelo CPRC (Capsule Pipeline Research Center) na Universidade de Missouri-Columbia os CLP's podem contar ainda com uma camada impermeabilizante de emulsão asfáltica, entre outras técnicas que reduzem a perda de material, e também a adição de pequenas frações de óxido de polietileno à água, reduzindo a força arrasto que atua contra o movimento, causando perda de energia. Estudos mostram que sua aplicação é viável para distâncias entre 50 e 2.000 km (ASCE, 1998).

Quanto às necessidades de transporte no Brasil, pode-se citar como exemplo específico de aplicação de HCP o transporte de carvão entre as minas de Tubarão/SC e o complexo termoelétrico de Jorge Lacerda, o que é feito, atualmente, via linha férrea. A substituição pelo transporte de carvão via CLP reduziria os custos a médio prazo, uma vez que o elevado custo inicial de implantação seria diluído em poucos anos tornando a relação R$/(ton.km) inferior a da ferrovia.

MODELAGEM COMPUTACIONAL

Fundamentação teórica e metodologia

O software utilizado neste estudo foi o Ansys CFX v14, portanto, toda a fundamentação teórica e metodologia citadas em seguida são as mesmas consideradas por esta ferramenta computacional. Para calcular a distribuição das pressões atuantes ao redor da cápsula é necessário se prever o comportamento do fluido (água) no interior do duto, cujo escoamento se caracteriza como turbulento. Com este objetivo, são utilizadas as equações de *Navier-Stokes* com média de *Reynolds*:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \qquad (1)$$

e

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = -\frac{1}{\rho_0}\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\nu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} - \overline{u_i' u_j'}\right) + g_i , \qquad (2)$$

onde $\bar{u}_i$ é a componente da velocidade média na direção x_i, $\bar{p}$ é a pressão média e ν a viscosidade cinemática. Como o fluido em questão pode ser considerado incompressível, a massa específica ρ_0 é constante.

Para obtenção do termo $\overline{u'_i u'_j}$, denominado tensor de *Reynolds*, foi adotado o modelo de turbulência SST (*Shear Stress Transport*), que leva em conta o transporte de tensão cisalhante e adota uma relação de proporcionalidade entre a tensão de cisalhamento de Reynolds e a energia cinética turbulenta.

As Equações **(1)** e **(2)** não possuem solução analítica para o problema físico em questão e, portanto, para a obtenção de uma solução aproximada, é utilizado o Método dos Volumes Finitos (MVF). Este método consiste em se discretizar o domínio de interesse em volumes de controle finitos, formando uma malha, e aplicar a equação do transporte por integração numérica em cada um deles, de acordo com a equação:

$$\left(\frac{\rho\phi - \rho^0\varphi^0}{\Delta t}\right)\forall + \sum_{pi} \rho u_j \Delta n_j \phi_f = \sum_{pi}\left(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_j}\Delta n_j\right)_{pi} + \bar{S}_\varphi \forall , \qquad (3)$$

onde ϕ é a grandeza física que será integrada, podendo ser massa, quantidade de movimento linear e angular e energia. Δn_j é o vetor de superfície normal discreto, Γ_ϕ é o termo difusivo e $\bar{S}_\phi$e o valor médio da fonte ao longo do volume de controle. Os somatórios são feitos para cada ponto de integração (pi).

A aplicação da Equação (**3**), complementada pelas Equações **(1)** e **(2)** em todos os elementos na malha resulta em um sistema de equação lineares, que, após resolvido, fornece a solução aproximada para o escoamento em questão.

Condições de Contorno

O modelo computacional foi desenvolvido procurando-se representar as mesmas condições do experimento realizado por Liu e Graze (1983), onde um cápsula é fixada no interior da tubulação e piezômetros foram instalados em diversos pontos. A tubulação possui um diâmetro interno de 232 mm e a cápsula tem 200 mm de diâmetro e 1 m de comprimento. As condições de contorno adotadas foram as seguintes:

Entrada: velocidade especificada igual à velocidade média do escoamento, correspondente a uma vazão constante de 0,0117 m³/s. Como esta situação não reflete a realidade do escoamento no interior de um duto, pois há uma distribuição não uniforme da velocidade ao longo da seção, o contorno de entrada foi modelado há uma distância de dez vezes o diâmetro do duto. Desta forma, até alcançar a cápsula, o perfil de distribuição da velocidade já está desenvolvido, devido ao efeito das tensões viscosas na parede. A turbulência de entrada adotada foi de 5%.

Saída: pressão especificada igual à pressão estática.

Superfícies do tubo e cápsula: é adotada a condição do tipo parede, onde a velocidade é nula. Foram consideradas superfícies lisas (rugosidade nula).

Simetria: Possibilitado pela geometria do problema, um plano vertical de simetria contendo o eixo do tubo foi considerado com o intuito de se modelar apenas uma metade simétrica, reduzindo a quantidade de elementos necessária.

Discretização espacial

Foram utilizados elementos hexagonais, nas regiões onde o escoamento possui velocidades predominantemente axiais e elementos tetraédricos no restante do domínio. Para uma boa representação da camada limite, foi aplicado um refinamento da malha nas proximidades das superfícies tanto do tubo, quanto da cápsula.

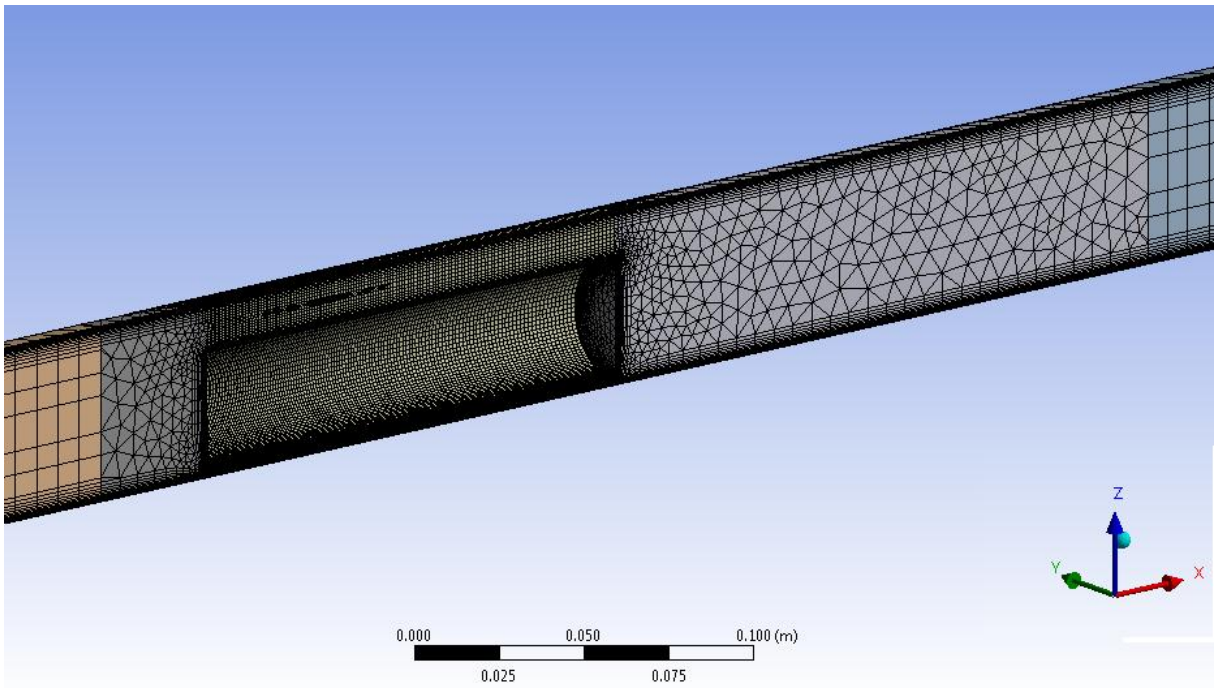

Figura 2 – Malha utilizada

A malha gerada possui aproximadamente 400 mil elementos e pode ser observada na Figura 2.

Resultados

Os principais resultados desta análise são as distribuições de pressão ao longo da superfície da cápsula. No entanto, dada a disponibilidade de respostas fornecida pela ferramenta computacional utilizada, se faz válida a observação de outros resultados, tais como as linhas de corrente visualizadas na Figura 3.

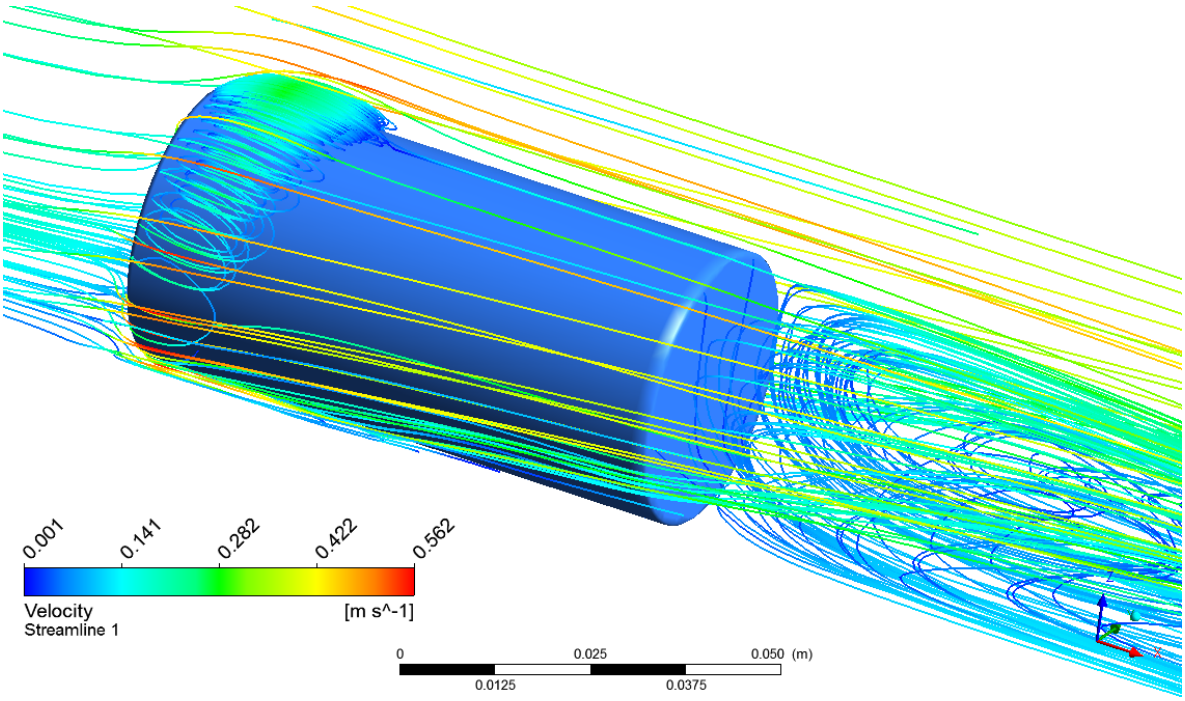

Figura 3 – Linhas de corrente nas proximidades da cápsula

Pode-se constatar as recirculações que ocorrem na parte superior da cápsula, próximo a sua montante, e na jusante da cápsula. Tais recirculações são responsáveis pela maior parte da perda de carga e consequente queda de pressão que ocorre. Portanto, sua previsão precisa pelo método numérico utilizado é de fundamental importância e está de acordo com as observações relatadas no experimento de Liu e Graze (1983).

Nas figuras seguintes, são apresentados os resultados para as pressões na superfície da cápsula e sua comparação com os resultados do experimento em referência. Os gráficos representam uma medida adimensional da pressão, calculada por:

$$h' = \frac{2g(h - h_0)}{V^2}, \qquad (4)$$

onde h é a pressão obtida em m.c.a., V é a velocidade média do escoamento e h_0 é a medida do referencial da bancada do experimento. A pressão é medida ao longo de geratrizes da cápsula que formam um ângulo predeterminado com o diâmetro vertical. A posição da medição é apresentada pela posição x dividida pelo comprimento L da cápsula.

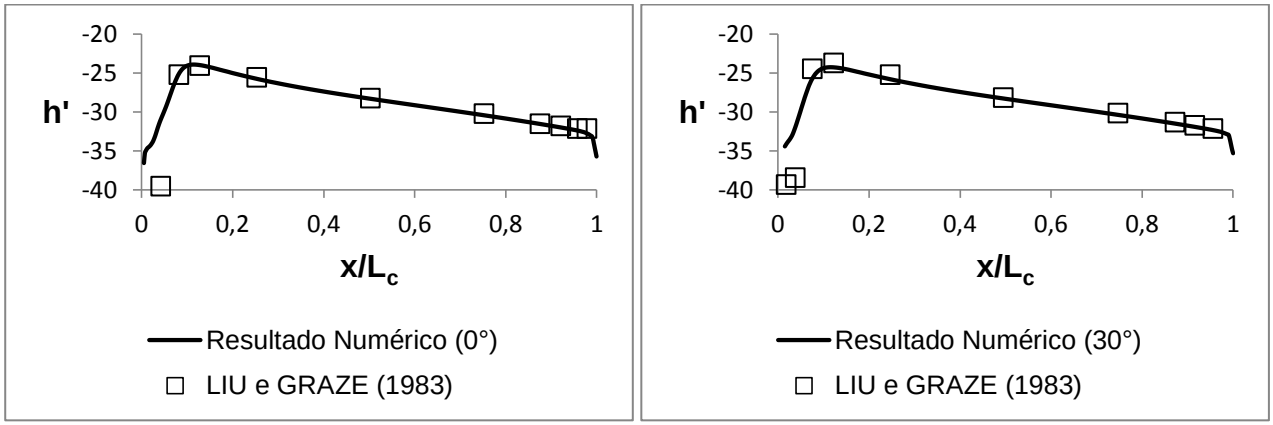

Figura 4 – Pressões na cápsula. Ao longo da geratriz superior (esq.) e a 30° da vertical (dir.)

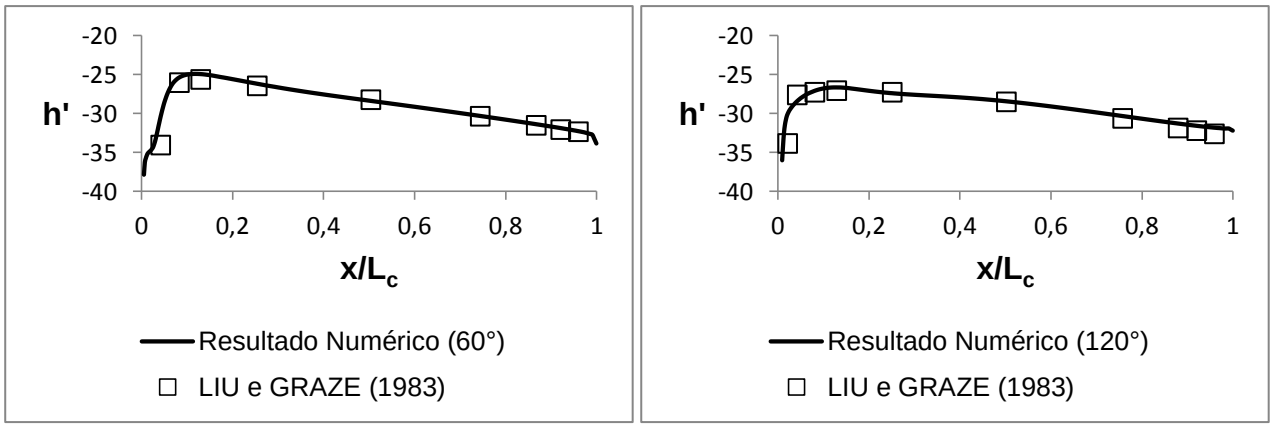

Figura 5 – Pressões na cápsula. Ao longo da geratriz a 60° (esq.) e a 120° da vertical (dir.)

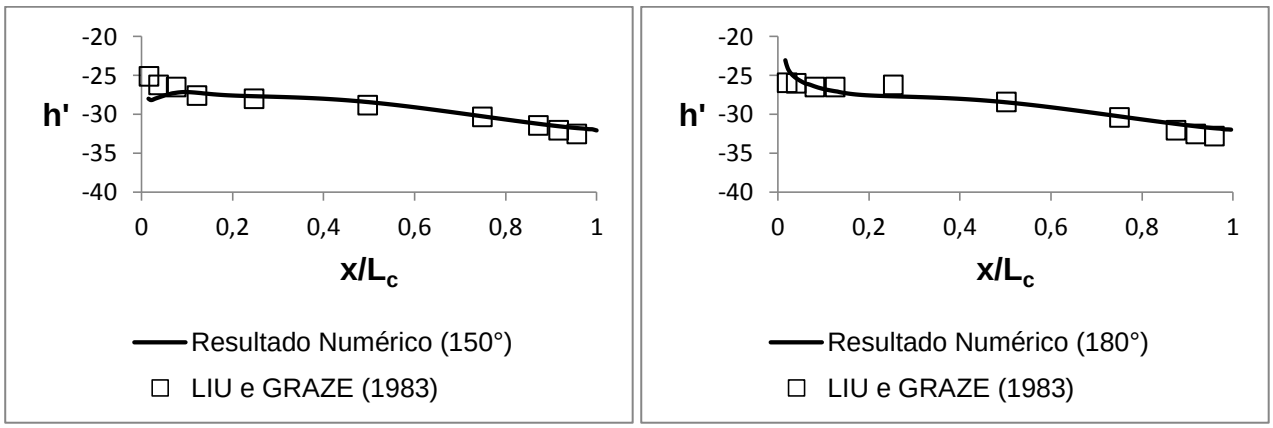

Figura 6 – Pressões na cápsula. Ao longo da geratriz a 150° (esq.) e a 180° da vertical (dir.)

Observa-se grande proximidade entre os resultados obtidos experimentalmente e pela modelagem computacional. No entanto, há uma discrepância, na maioria dos gráficos, nas proximidades da extremidade a montante da cápsula. Esta se deve a elevada influência que o formato exato da aresta da cápsula tem no escoamento das posições imediatamente próximas e a dificuldade de se prevê-lo, dada a sua instabilidade. Porém, esta diferença é, praticamente, pontual e tem influência desprezível ao se calcular a força total da pressão na cápsula, que é responsável pelo seu movimento.

CONCLUSÂO

Os resultados obtidos pela análise computacional foram muito próximos àqueles apresentados pelo experimento de Liu e Graze (1983), corroborando a confiabilidade do método numérico adotado. Sendo a pressão a principal responsável pela força total exercida pelo fluido na cápsula, mesmo que seja difícil a comparação dos dados de tensão cisalhante com o experimento, garante-se que a força calculada numericamente é precisa.

A modelagem computacional possibilita o estudo aprofundado do escoamento referente ao transporte por HCP, disponibilizando uma grande diversidade de resultados e parâmetros importantes para o futuro desenvolvimento desta tecnologia.

Trabalhos futuros de modelagem computacional podem estender o presente estudo para o comportamento da cápsula e do fluido em regime dinâmico, considerando-se a interação entre fluido e estrutura.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS – ASCE (1998). *Fright pipelines: current status and anticipated future use*. Journal of transportation engineering, EUA, v. 124, n. 4, julho/agosto.

LAMPE, D. (1959) *Pyke: The unknown genius*. Evans Brothers Ltd., London, England.

LIU, H.; GRAZE, H. R. (1983). *Lift and Drag on Stationary Capsule in Pipeline*. Journal of Hydraulic Engineering, EUA, v. 109, n. 1.

LIU, H. (2006). *Transportating Freight Containers by Pneumatic Capsule Pipeline (PCP): Port Security and Other Issues*. U.S. Transportation Research Board (TRB) Meeting, 2006, California/EUA.