

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

1° Ten GABRIEL DE CARVALHO NASCIMENTO

**MODELAGEM COMPUTACIONAL DE TRANSPORTE
ENCAPSULADO EM DUTOVIAS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia de Transporte do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciências em Engenharia de Transportes.

Orientadores: Prof. José Carlos Cesar Amorim, D.Ing.
Maj Carlos A. B. de Vasconcellos, D.Sc.

Rio de Janeiro

2013

c2013

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

Praça General Tibúrcio, 80 – Praia Vermelha

Rio de Janeiro – RJ CEP: 22290-270

Este exemplar é de propriedade do Instituto Militar de Engenharia, que poderá incluí-lo em base de dados, armazenar em computador, microfilmar ou adotar qualquer forma de arquivamento.

É permitida a menção, reprodução parcial ou integral e a transmissão entre bibliotecas deste trabalho, sem modificação de seu texto, em qualquer meio que esteja ou venha a ser fixado, para pesquisa acadêmica, comentários e citações, desde que sem finalidade comercial e que seja feita a referência bibliográfica completa

Os conceitos expressos neste trabalho são de responsabilidade do autor e dos orientadores.

629.04 Nascimento, Gabriel de Carvalho.
N244m Modelagem computacional de transporte encapsulados em dutovias/Gabriel de Carvalho Nascimento; orientado por José C. C. Amorim e Carlos A. B. de Vasconcellos – Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia, 2013.

100 p.: il.

Dissertação (mestrado) – Instituto Militar de Engenharia – Rio de Janeiro, 2013.

I. Engenharia de Transportes. 2. Transporte em dutovias. 3. Modelagem CFD. I. Amorim, José C. C. II. Vasconcellos, Carlos A. B. III. Título IV. Instituto Militar de Engenharia

CDD 629.04

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

1º Ten GABRIEL DE CARVALHO NASCIMENTO

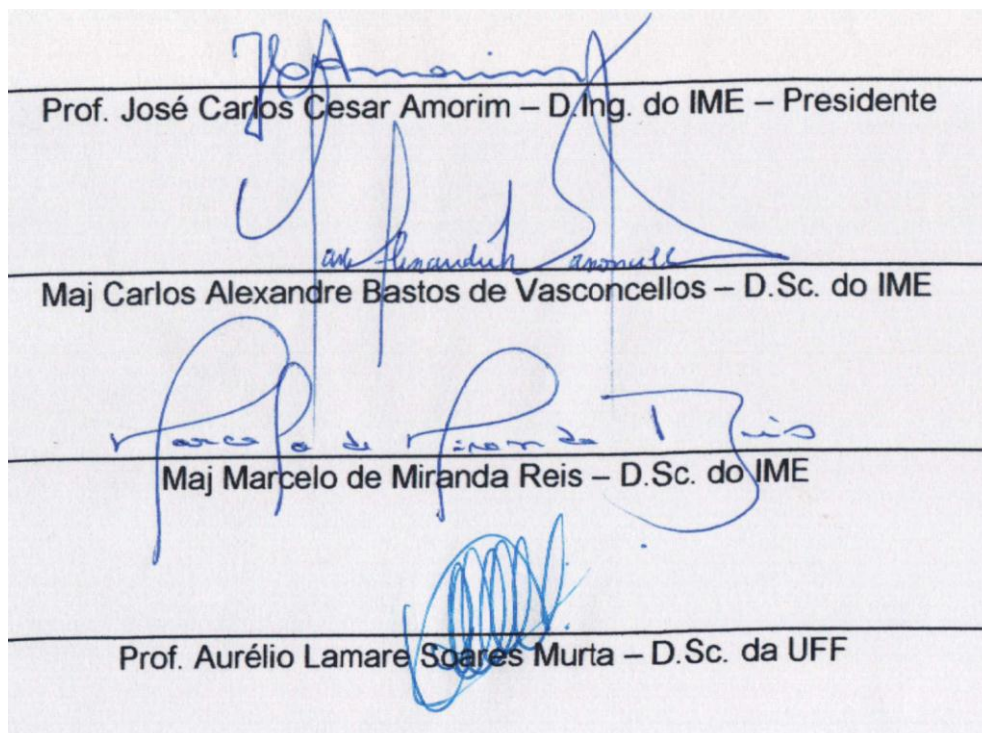
MODELAGEM COMPUTACIONAL DE TRANSPORTE

ENCAPSULADO EM DUTOVIAS

Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia de Transporte do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciências em Engenharia de Transportes.

Orientadores: Prof. José Carlos Cesar Amorim – D.Ing.
Maj Carlos Alexandre Bastos de Vasconcellos – D.Sc.

Aprovada em 31 de janeiro de 2013 pela seguinte Banca Examinadora:



Prof. José Carlos Cesar Amorim – D.Ing. do IME – Presidente

Maj Carlos Alexandre Bastos de Vasconcellos – D.Sc. do IME

Maj Marcelo de Miranda Reis – D.Sc. do IME

Prof. Aurélio Lamare Soares Murta – D.Sc. da UFF

Rio de Janeiro

2013

À minha noiva, Ana Caroline, pelo companheirismo
aos meus pais, Elson e Angela, pelo incentivo
e à minha irmã, Sophia, pelo apoio.

AGRADECIMENTOS

À minha noiva, Ana Caroline, por estar sempre ao meu lado, inclusive nos momentos mais difíceis ao longo desta jornada, me dando todo o suporte necessário para tornar possível a concretização deste trabalho.

Aos meus pais, Angela e Elson, que sempre me apoiaram e incentivaram, além de servirem como inspiração e exemplo que procuro seguir em todas as etapas da minha vida pessoal e profissional.

Ao Prof. Amorim pela orientação e conselhos que, baseados em seu profundo conhecimento em mecânica dos fluidos, foram de fundamental importância em todas as fases, desde a escolha do tema até a conclusão das últimas páginas da referida pesquisa.

Ao Maj Vasconcellos, pela constante orientação e dedicação, não medindo esforços para contribuir, com sua experiência e visão, em prol da relevância e qualidade no desenvolvimento do presente estudo.

A todos que compõe a Seção de Engenharia de Fortificação e Construção e a Pós-Graduação em Engenharia de Transporte do IME, pela prestatividade oferecida sempre que solicitados e o empenho aplicado ao curso de mestrado, tornando-o cada vez melhor.

Aos colegas Maj Rohan, Cap Alexandre Paiva, Cap Augusto, Cap Santana e Vitor Fernandes, pelo companheirismo e apoio oferecidos ao longo do curso.

“A mente que se abre a uma nova ideia jamais
voltará ao seu tamanho original”.

ALBERT EINSTEIN

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| LISTA DE ILUSTRAÇÕES..... | 09 |
| LISTA DE TABELAS..... | 11 |
| LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS..... | 12 |
| LISTA DE SIGLAS..... | 14 |
| | |
| 1. INTRODUÇÃO | 17 |
| 1.1. Considerações Iniciais..... | 17 |
| 1.1.1. Transporte Encapsulado..... | 20 |
| 1.1.2. Desafios para Implantação dos Sistemas Encapsulados | 21 |
| 1.1.3. Aplicabilidade no Brasil..... | 22 |
| 1.2. Objetivos..... | 23 |
| 1.2.1. Objetivo Geral..... | 23 |
| 1.2.2. Objetivos Específicos | 23 |
| 1.3. Justificativa e Relevância..... | 24 |
| 1.4. Estrutura da dissertação | 24 |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 26 |
| 2.1. Considerações Iniciais | 26 |
| 2.2. Aspectos Qualitativos | 27 |
| 2.2.1. Cápsulas Pneumáticas (PCP) | 29 |
| 2.2.2. Cápsulas Hidráulicas (HCP) | 34 |
| 2.3. Aspectos Econômicos | 36 |
| 2.4. Aspectos Técnicos..... | 39 |
| 2.4.1. Cápsulas pneumáticas (PCP)..... | 39 |
| 2.4.1. Cápsulas Hidráulicas (HCP) | 42 |
| 3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA..... | 51 |
| 3.1. Introdução..... | 51 |
| 3.2. Equações da Mecânica dos Fluidos | 51 |
| 3.3. Modelos de Escoamento Turbulento | 54 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 3.3.1. | Equações Médias de Reynolds | 56 |
| 3.3.1.1. | Modelo SST k- ω | 58 |
| 3.3.1.2. | Modelo RSM..... | 61 |
| 4. | MÉTODO NUMÉRICO | 64 |
| 4.1. | Método dos Volumes Finitos (MVF)..... | 64 |
| 4.2. | Funções de forma..... | 67 |
| 4.3. | Esquema advectivo | 70 |
| 4.4. | Acoplamento Pressão-Velocidade..... | 71 |
| 4.5. | Sistema de Equações Lineares | 71 |
| 4.6. | Interação fluido-estrutura..... | 72 |
| 5. | MODELAGEM COMPUTACIONAL | 75 |
| 5.1. | Problema Físico..... | 75 |
| 5.2. | Modelo computacional..... | 78 |
| 5.2.1. | Discretização Espacial..... | 79 |
| 5.2.2. | Condições de Contorno | 81 |
| 5.2.3. | Propriedade dos Materiais..... | 82 |
| 5.3. | Análise dos Resultados | 82 |
| 6. | CONCLUSÃO | 95 |
| 7. | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 97 |

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | | |
|----------|--|----|
| FIG. 1.1 | Matriz de transporte de carga no Brasil. | 17 |
| FIG. 1.2 | Evolução da matriz de transporte brasileira..... | 18 |
| FIG. 1.3 | Custos de transporte de carga no Brasil e nos EUA..... | 18 |
| FIG. 2.1 | Ilustração do túnel construído por Beach | 29 |
| FIG. 2.2 | PCP utilizado no <i>Friendship Hospital</i> – China | 30 |
| FIG. 2.3 | Protótipo de PCP para transporte de brita em Ontário, Canadá..... | 31 |
| FIG. 2.4 | PCP para transporte de calcário em Kuzuu, Japão..... | 32 |
| FIG. 2.5 | Túnel Akima (a), duto por módulos pré-moldados e a cápsula (b) | 32 |
| FIG. 2.6 | CLPs (a) e máquina de compactação das cápsulas (b). | 35 |
| FIG. 2.8 | LIM em menor escala para duto de 8” | 41 |
| FIG. 2.9 | Regimes do escoamento em HCP..... | 43 |
| FIG. 3.1 | Fluido compreendido por um cubo infinitesimal..... | 52 |
| FIG. 3.2 | Escoamento Laminar X Turbulento | 54 |
| FIG. 3.3 | Flutuação da pressão num escoamento turbulento | 57 |
| FIG. 4.1 | Volume de controle..... | 65 |
| FIG. 4.2 | Elemento da malha..... | 66 |
| FIG. 4.3 | Elemento hexaédrico | 68 |
| FIG. 4.4 | Elemento tetraédrico..... | 68 |
| FIG. 4.5 | Elemento prismático | 69 |

| | |
|---|----|
| FIG. 4.6 Elemento piramidal | 69 |
| FIG. 4.7 Interação fluido-estrutura | 73 |
| FIG. 5.1 Representação esquemática do escoamento..... | 75 |
| FIG. 5.2 Cápsula modelada no interior do duto e eixos cartesianos adotados..... | 79 |
| FIG. 5.3 Malha gerada (vista geral) | 80 |
| FIG. 5.4 Malha gerada (vista em corte) | 80 |
| FIG. 5.5 Velocidades na seção cheia do tubo (caso 2) | 83 |
| FIG. 5.6 Descolamento e recirculação na superior à montante (Caso 1) | 84 |
| FIG. 5.7 Recirculação em torno da cápsula (caso 4)..... | 85 |
| FIG. 5.8 Área de escoamento efetivo na seção crítica (caso 6) | 86 |
| FIG. 5.9 Recirculação formada na região à jusante da cápsula (caso 4) | 87 |
| FIG. 5.10 Pressão manométrica na geratriz superior da cápsula (Caso 6) | 88 |
| FIG. 5.11 Força de arrasto na cápsula (caso 5) | 88 |
| FIG. 5.12 Pressões na superfície da cápsula em $\theta=0^\circ$ (a) e $\theta=30^\circ$ (b)..... | 92 |
| FIG. 5.13 Pressões na superfície da cápsula em $\theta=60^\circ$ (a) e $\theta=120^\circ$ (b)..... | 93 |
| FIG. 5.14 Pressões na superfície da cápsula em $\theta=150^\circ$ (a) e $\theta=180^\circ$ (b)..... | 94 |

LISTA DE TABELAS

| | | |
|----------|--|----|
| TAB. 2.1 | Capacidade de transporte do PCP | 39 |
| TAB. 2.2 | Valores usuais para parâmetros de PCP..... | 42 |
| TAB. 2.3 | Comparação entre dados experimentais e teóricos..... | 46 |
| TAB. 2.4 | Comparação entre dados experimentais, resultados teóricos anteriores e revisados..... | 48 |
| TAB. 2.5 | Exemplos de valores para as velocidades..... | 49 |
| TAB. 3.1 | Constantes dos métodos $k-\omega$ e $k-\epsilon$ | 60 |
| TAB. 3.2 | Coeficientes do modelo RSM | 63 |
| TAB. 5.1 | Propriedades dos materiais modelados..... | 82 |
| TAB. 5.2 | Resumo dos resultados | 89 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ABREVIATURAS

| | | |
|------------------|---|----------------------------------|
| SC | - | Superfície de controle |
| VC | - | Volume de controle |
| $\max(a_1; a_2)$ | | Valor máximo entra a_1 e a_2 |
| $\min(a_1; a_2)$ | | Valor mínimo entra a_1 e a_2 |
| π_i | - | Ponto de Integração |
| desl | - | Deslocamento |
| tan | - | Tangente |
| sen | - | Seno |
| cos | - | Cosseno |

SÍMBOLOS

| | | |
|---------------|---|---|
| ρ | - | Massa específica |
| ε | - | Taxa de dissipação da energia cinética turbulenta |
| \forall | - | Volume |
| δ_{ij} | - | Delta de Kronecker |
| \bar{u}_i | - | Componente do vetor velocidade média na direção i |
| S_{ij} | - | Tensor de deformação |
| x_i | - | Medida na direção i |
| μ_t | - | Viscosidade dinâmica turbulenta |
| ν_t | - | Viscosidade cinemática turbulenta |

| | | |
|---------------|---|--|
| σ_{ij} | - | Tensor viscoso |
| Ω_{ij} | - | Tensor de rotação médio |
| a | - | Razão entre o diâmetro da cápsula e do duto |
| d | - | Densidade |
| D | - | Diâmetro interno do duto |
| D_c | - | Diâmetro da cápsula |
| g | - | Aceleração gravitacional |
| k | - | Energia cinética turbulenta |
| K | - | Razão diametral entre cápsula e duto |
| L_c | - | Comprimento da cápsula |
| p | - | Pressão |
| Re | - | Número de Reynolds |
| t | - | Variável tempo |
| u_i | - | Componente do vetor velocidade na direção i |
| V_0 | - | Velocidade crítica |
| V_i | - | Velocidade incipiente |
| V_s | - | Velocidade de sustentação |
| Γ | - | Coeficiente de difusividade |
| θ | - | Medida angular |
| μ | - | Viscosidade dinâmica |
| ν | - | Viscosidade cinemática |
| ϕ | - | Variável que representa uma grandeza física genérica |
| ω | - | Taxa de dissipação específica da energia cinética turbulenta |

LISTA DE SIGLAS

| | |
|---------|---|
| CNT | Confederação Nacional do Transporte |
| CPRC | <i>Capsule Pipeline Research Center</i> |
| CENTRAN | Centro de Excelência em Engenharia de Transportes |
| HCP | <i>Hydraulic Capsule Pipeline</i> |
| PCP | <i>Pneumatic Capsule Pipeline</i> |
| CLP | <i>Coal Log Pipeline</i> |
| TKU | Tonelada-Quilômetro Útil |
| ASCE | <i>American Society of Civil Engineers</i> |
| SMI | <i>Sumitomo Metal Industries</i> |
| LIM | <i>Linear Induction Motor</i> |
| NYSERDA | <i>New York State Energy Research and Development Authority</i> |
| NSC | <i>Nippon Steel Corporation</i> |
| RANS | <i>Reynolds Averaged Navier-Stokes</i> |
| SST | <i>Shear Stress Transport</i> |
| CFD | <i>Computational Fluid Dynamics</i> |
| MVF | Método dos Volumes Finitos |
| MEF | Método dos Elementos Finitos |
| MDF | Método das Diferenças Finitas |

RESUMO

A sobrecarga da infraestrutura de transportes, que se amplifica cada vez mais devido ao crescente desenvolvimento econômico do país, somada à busca por meios alternativos mais econômicos e menos poluentes, vem gerando demanda para o desenvolvimento de tecnologias inovadoras nesta área. Uma das alternativas viáveis para atender à crescente necessidade de capacidade de transporte é o transporte dutoviário encapsulado. Neste trabalho, esta técnica é apresentada com suas significativas vantagens quando analisadas sob o contexto atual da infraestrutura de transportes. Além disso, suas desvantagens e dificuldades para implantação são apresentadas. O foco principal deste trabalho é realizar uma modelagem computacional do escoamento que ocorre no interior do duto e sua consequente interação com a cápsula, a fim de viabilizar técnica e economicamente a referida tecnologia. Tal modelagem tem como principal incógnita as velocidades desenvolvidas pelo fluido (ar ou água) e, eventualmente, pela cápsula para diferentes vazões e diversos parâmetros de projeto. Os resultados obtidos na modelagem foram compatíveis com aqueles encontrados na literatura experimental e empírica. Por fim, é mostrado que o transporte em cápsulas por dutos tem potencial de aplicação em larga escala para diversas cargas como minérios, grãos, agregados, resíduos, produtos industrializados, correspondências, dentro outros.

ABSTRACT

The overload of the transport system that increases even more due to the growing economic development in Brazil, added to the search for more economic and environmental friendly solutions demands research for enhanced technologies at this subject. One of the possible alternatives to meet the growing need for transport capacity is the encapsulated pipeline. At the present work, this technique is reintroduced with its significant advantages, analyzed under the actual context of transport infrastructure. The disadvantages of this transport and consequent difficulties in a possibly attempt to adopt this technique are discussed as well. As the main objective of this work it was done a computational modeling of the flow that occurs inside the pipe and its consequent interaction with the capsule in order to sustain the methodology that points to the technical and economic viability. Such modeling aims to calculate the velocities produced by the fluid (air or water) and, eventually, by the capsule at several different flows and design parameters. The results achieved from computer modeling match with those found in experimental and theoretical literature. Finally, it is shown that encapsulated pipeline transport have the potential to be applied in large scale to several freight such as mineral, grains, aggregates, waste, manufactured products, mail, among others.

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A matriz de transporte de cargas brasileira possui uma má distribuição entre seus modais, com a maior parte concentrada no modal rodoviário, equivalente a 61,1%, cerca de três vezes a do segundo modal mais utilizado, o ferroviário, que possui uma participação de 20,7%, conforme observado na FIG. 1.1.

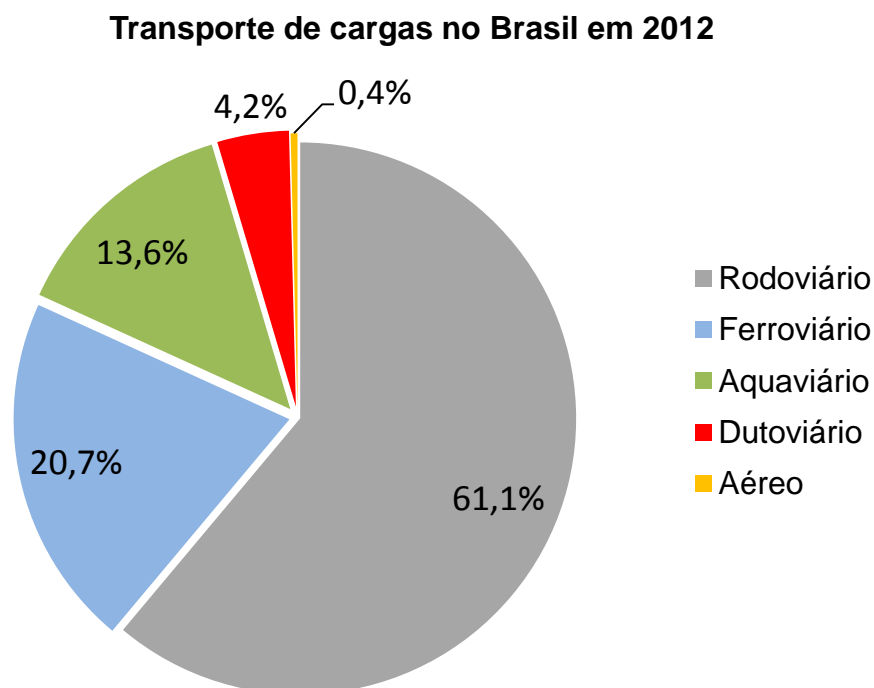


FIG. 1.1 Matriz de transporte de carga no Brasil (adaptado de CNT, 2012).

O modal dutoviário contribui com apenas 4,2% para o transporte de cargas. Apesar de este valor apresentar uma ascensão nos últimos anos, conforme a FIG. 1.2, ele ainda é muito inferior ao encontrado em países desenvolvidos de mesmo porte que o Brasil, como, por exemplo, nos EUA, onde é de 19% (FLEURY, 2011). A previsão quanto à participação das dutovias, apresentada em estudo realizado pelo

CENTRAN (2007) para o ano de 2025, não difere substancialmente do quadro atual, mantendo, aproximadamente, a mesma taxa de crescimento anual.

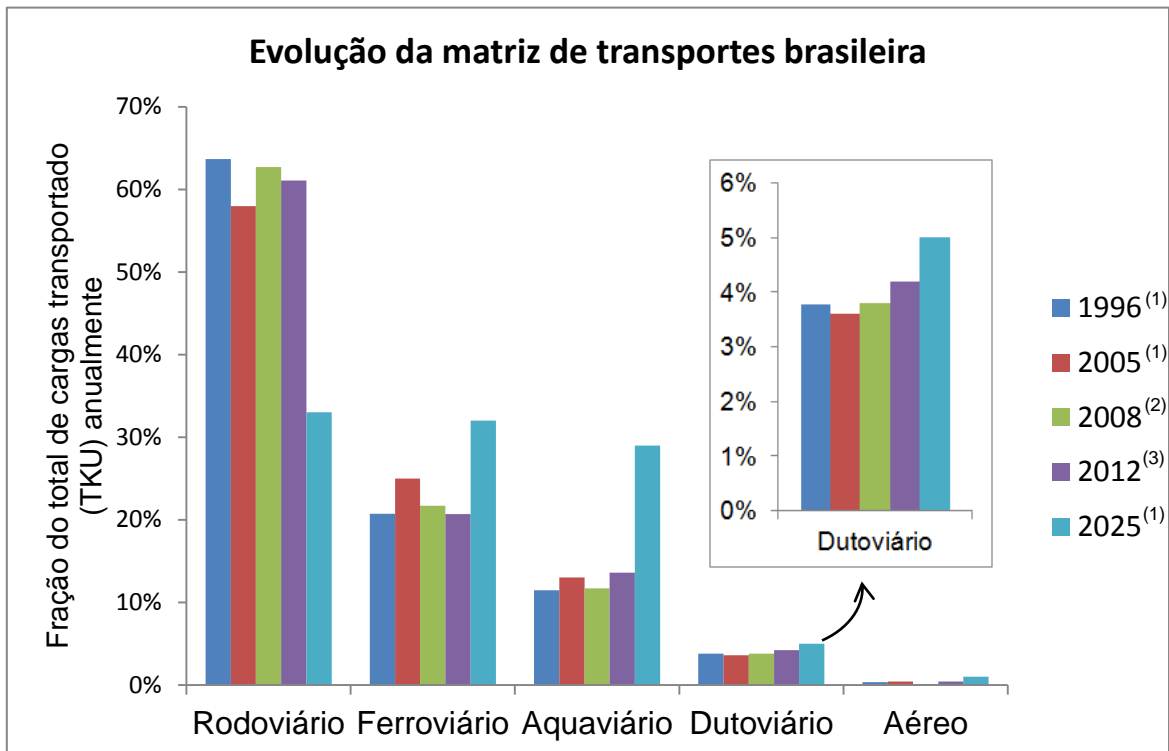


FIG. 1.2 Evolução da matriz de transporte brasileira. Adaptado de: ⁽¹⁾CENTRAN, 2007; ⁽²⁾FLEURY, 2011; ⁽³⁾CNT, 2012.

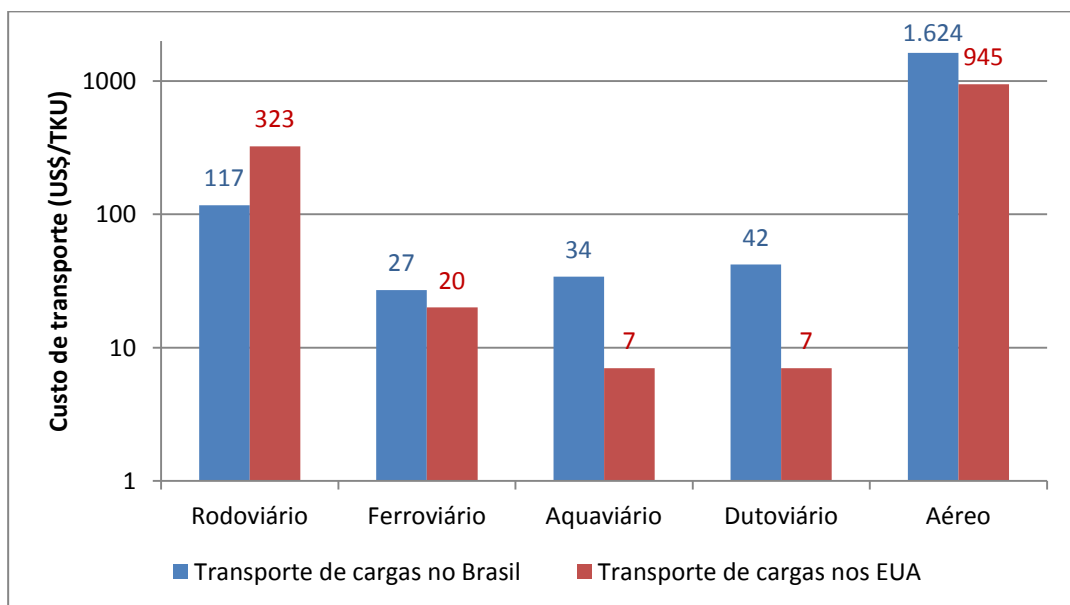


FIG. 1.3 Custos de transporte de carga no Brasil e nos EUA (FLEURY, 2011)

Comparando-se o custo de transporte entre o Brasil e os EUA, observa-se que, com exceção do rodoviário, os custos encontrados nos EUA são consideravelmente inferiores aos do Brasil, destacando-se o aquaviário e dutoviário, cujos custos no Brasil são US\$ 34 e US\$ 42 por mil TKU, respectivamente (FIG. 1.3); e nos EUA ambos são US\$ 7 / mil TKU. Segundo FLEURY (2011), mesmo com os custos unitários brasileiros, se as distribuições entre os modais estadunidenses fossem aplicadas no Brasil, haveria uma economia de R\$ 58 bi e uma redução de 35% nas emissões de gases do efeito estufa.

A pouca utilização de dutovias no Brasil se deve a diversos fatores, entre eles à falta de investimento e incentivo por parte do governo em obras deste modal. Outro aspecto importante é o fato de que sua aplicabilidade se restringe ao transporte de líquido, gás e materiais em suspensão. Os exemplos mais comuns encontrados no Brasil são: petróleo, gás natural e minério. Além disso, este modal tem um custo elevado de implantação, quando comparado à sua baixa velocidade de transporte e aplicabilidade.

Porém, outros aspectos das dutovias possuem os melhores índices entre todos modais, sendo eles:

- a confiabilidade;
- a frequência de operação; e
- o baixo impacto ambiental.

Somado a isso, 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 permitem que seja utilizado 24 horas por dia e 7 dias por semana, resultando numa frequência de operação muito elevada, com interrupções apenas para manutenção.

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. Além disso, neste modal, a maior parte da massa transportada pertence à carga de interesse, ao contrário de outros modais, resultando na maior eficiência energética entre todos modais.

Estes fatores positivos motivam a busca de métodos que permitam o aumento da variabilidade em tipos de cargas que possam ser transportadas, os quais tornariam este modal bastante atrativo e até mesmo uma solução para diminuição da sobrecarga na infraestrutura de transportes do país. Neste contexto, é proposto o transporte encapsulado, com o intuito de se aproveitar os diversos fatores positivos do modal dutoviário, variando-se os tipos de carga aos quais se aplica.

1.1.1. TRANSPORTE ENCAPSULADO

O presente trabalho apresenta uma solução através do transporte em dutos por cápsulas, que pode acomodar diversos tipos de carga e tem como limitação apenas suas dimensões.

O transporte encapsulado em dutovias consiste basicamente em se propelir cápsulas devido ao 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 fluido utilizado para o impulsionamento, os dutos são classificados como HCP (*Hydraulic Capsule Pipeline*), quando o fluido é a água, ou PCP (*Pneumatic Capsule Pipeline*), se o fluido é o ar.

As pesquisas mais importantes sobre este assunto surgiram a partir da década de 80, tendo seu auge a partir de 1991, quando fora instalado o *Capsule Pipeline Research Center* (CPRC) na Universidade de *Missouri-Columbia*. Neste centro de pesquisa, destacam-se experimentos envolvendo o escoamento ao redor da cápsula

e a formulação de equações representativas (LIU e RICHARDS, 1994). Dentre as publicações recentes, destaca-se a avaliação de custos para construção de túneis (LUO *et al.*, 2008) e o desenvolvimento de motores de indução linear (PLODPRADISTA, 2010).

O transporte encapsulado já é utilizado no Japão para calcário a grandes distâncias e em vários países para produtos diversos em menor escala. Desta forma, para o aprofundamento do estudo do transporte encapsulado, é necessária a avaliação do tipo de carga a ser transportada, bem como as características da cápsula e fluido.

1.1.2. DESAFIOS PARA IMPLANTAÇÃO DOS SISTEMAS ENCAPSULADOS

Apesar dos diversos fatores positivos levantados por décadas de pesquisa em diversos países, o transporte encapsulado em dutos ainda é inexpressivo e desconhecido. Há algumas causas que explicam este entrave.

Entre os maiores desafios para o seu efetivo desenvolvimento encontra-se a aceitação do meio de transporte inovador contra os já consolidados modais de transporte convencionais. A chave para a competitividade está em oferecer soluções para as limitações e os efeitos negativos dos outros modais.

Além disso, a falta de conhecimento leva ao desinteresse por parte dos governantes, o que dificulta um possível incentivo fiscal para aceitação e desmistificação por parte dos investidores privados e da população. O elevado custo inicial de pesquisa e implantação é um fator crucial na escolha desse entre outros meios de transporte. Portanto, para se verificar a importância desta solução inovadora, o estudo de uma viabilidade é necessário de forma ampla e de longo prazo.

Por se tratar de um sistema que funciona ininterruptamente, a transferência intermodal das cargas se torna um ponto crítico, uma vez que nenhum outro modal opera neste regime. Para tal, uma logística abrangente deverá ser implantada,

possibilitando que o potencial deste sistema seja totalmente utilizado, não havendo interrupções por incompatibilidades durante o traslado entre outros modais.

O projeto e a construção dos primeiros sistemas com cápsulas constituem uma barreira a ser quebrada. Novas pesquisas aliadas às ferramentas tecnológicas atuais como modelagem computacional iriam contribuir para o domínio dessa tecnologia, possibilitando um alto índice de confiabilidade na previsão de custos, condições de operação, rendimento, etc.

1.1.3. APLICABILIDADE NO BRASIL

Quanto às necessidades de transporte no Brasil, pode-se destacar a aplicação de PCP para agregados, minérios e grãos. Outras aplicações específicas podem ser levantadas, como redes de PCP para transporte de cargas entre portos e anéis rodoviários, desafogando o tráfego dessas cargas pesadas nos centros urbanos.

Em maior escala, pode-se idealizar a ligação direta entre áreas de mineração (Minas Gerais) e portos hidroviários (São Paulo, Rio de Janeiro e Espírito Santo), o que já está sendo implantado com dutovias convencionais.

Certamente, a troca de correspondências, encomendas e valores monetários entre grandes cidades como Rio e São Paulo também, provavelmente, possui grande viabilidade de ser feita via PCP.

Já o HCP, seria uma solução para retirada de carvão de minas e de resíduos sólidos dos grandes centros urbanos e indústrias, destinados a lixões e centros de reciclagem. Um exemplo específico é 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\$/TKU inferior a da ferrovia, de acordo com estudos que serão apresentados neste trabalho.

Um estudo de viabilidade técnica e econômica poderia apontar todas as aplicações deste meio de transporte às cargas mais transportadas no Brasil. Outros fatores como o relevo acidentado e grandes distâncias devem ser considerados. A utilização de dutovias já existentes, quando disponíveis, para transporte de cápsulas também pode ser avaliado, dada à eliminação do seu maior custo: a implantação.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. OBJETIVO GERAL

O presente trabalho tem por objetivo apresentar o transporte encapsulado em dutovias e, principalmente, desenvolver um modelo computacional que represente o comportamento das cápsulas hidráulicas (HCP) validado pelos dados disponíveis na literatura obtidos a partir de experimentos e desenvolvimento matemático do fenômeno físico em questão.

1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para alcançar os objetivos gerais, primeiramente, fora realizada uma pesquisa bibliográfica entre livros, artigos e apresentações em congressos sobre todos os aspectos referente à modalidade de transporte pesquisada neste trabalho.

Posteriormente, se fez necessário o estudo da fundamentação teórica aplicada para a previsão do comportamento dos fluidos, mais especificamente, da água, que se enquadra no campo das ciências denominado mecânica dos fluidos. A solução das equações que regem o comportamento dos fluidos foi obtida a partir da aplicação do Método dos Volumes Finitos (MVF).

Finalmente, um modelo computacional foi criado, incluindo o fluido, a cápsula e a interação entre eles. Diversos resultados são analisados, entre eles a velocidade

incipiente. Os resultados obtidos são comparados com os apresentados por outros autores através de fórmulas empíricas, medições e observações feitas a partir de experimentos.

1.3. JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA

Este trabalho se justifica pela obtenção de maiores informações sobre uma tecnologia que, em análises iniciais, apresenta possibilidade de contribuir para o suprimento da demanda em capacidade de transporte no Brasil e no mundo.

Além disso, trata-se de um modal pouco poluidor, o que poderia trazer uma redução na quantidade da emissão de poluentes causada pelos demais modais.

Poucas são as pesquisas disponíveis relevantes sobre o referido assunto e nenhuma delas teve como mesmo objetivo aquele apontado neste trabalho.

1.4. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação foi estruturada em capítulos divididos de acordo com a descrição abaixo:

- Capítulo 1 – Introdução: neste capítulo é feita uma breve introdução sobre o assunto, além de apresentados o objetivo do trabalho, a justificativa e relevância, assim como sua organização;
- Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica: serão comentados os principais aspectos do transporte encapsulado, além de um breve histórico e, principalmente, as pesquisas já realizadas sobre o assunto;
- Capítulo 3 – Fundamentação Teórica: neste capítulo, é apresentada, resumidamente, a teoria necessária para as análises desenvolvidas nos capítulos subsequentes;

- Capítulo 4 – Método Numérico: dando continuidade ao capítulo anterior, é descrita a ferramenta numérica aplicada para utilização das fórmulas disponibilizadas pela teoria;
- Capítulo 5 – Modelagem Computacional: neste capítulo, é descrito o modelo desenvolvido para a simulação do escoamento e são apresentados os resultados obtidos; e
- Capítulo 6 – Conclusões: finalmente, são feitas conclusões acerca dos principais tópicos apresentados ao longo de todo o trabalho, principalmente, sobre os resultados obtidos no modelo computacional.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O transporte encapsulado em dutos é pouco explorado do ponto de vista científico e do ponto de vista tecnológico é muitas vezes visto como uma solução “futurística” para o transporte de cargas (e.g. Welsh Assembly Government, 2008). A grande maioria das publicações sobre o assunto apenas cita superficialmente, sem detalhes técnicos sobre seu funcionamento sem qualquer estudo de eficiência e viabilidade econômica.

Em 1991, Henry Liu, professor e pesquisador da Universidade de Missouri-Columbia criou, o *Capsule Pipeline Research Center* (CPRC), subsidiado pelo *National Science Foundation* dos EUA, onde realizou experimentos envolvendo HCP, PCP e CLP, sendo este último um caso específico do HCP (KAHALIL, 2009). Alguns desses experimentos produziram soluções analíticas que serão de fundamental importância para validação dos resultados obtidos no presente trabalho.

Segundo ROBERTS (2012), Liu faleceu em dezembro de 2009 e sua pesquisa não foi continuada. Desde então, nenhum pesquisador voltou a estudar transporte encapsulado com a mesma abrangência, profundidade e entusiasmo.

Serão citadas neste capítulo as principais publicações existentes sobre o referido assunto e sua relevância para o presente estudo. Tais documentos podem ser divididos em três aspectos:

- um de caráter qualitativo, consistindo de definições, um breve histórico, aspectos logístico e político;
- outro de caráter técnico, como experimentos e simulações computacionais; e
- por fim, de caráter econômico.

2.2. ASPECTOS QUALITATIVOS

A ASCE (1998) define dutos de carga como dutovias pelas quais se transportam cargas sólidas, líquidos ou gases engarrafados e ainda os subdivide em minerodutos, dutos pneumáticos e encapsulamento em dutos.

O primeiro consiste em tubulações que transportam, em seu interior, minério suspenso em água. Para tal, é necessário que haja um sistema de mistura com a água, numa extremidade da rede, e outro de separação, na outra extremidade, normalmente por centrifugação. Este processo exige considerável custo energético e financeiro. Porém, diversas vantagens são apontadas, o que o torna atrativo para o transporte desse tipo de produto.

De acordo com a ASCE (1998), os dutos pneumáticos transportam sólidos por sucção ou pressurização do ar na tubulação. Para que as partículas sólidas a serem transportados fiquem em suspensão no ar, é necessária uma elevada velocidade, na ordem de 20 m/s (LIU, 2000), e, conseqüentemente, uma elevada pressurização, o que torna este sistema viável apenas para distâncias menores que 1 km. Alguns exemplos de utilização são: complexos de apartamento no Japão, centros de entretenimento como a Disney World e diversos tipos de indústrias de celulose e papel, serrarias, fábricas de cimento, siderúrgicas, etc.

Um exemplo de aplicação de dutos pneumáticos encontra-se em Barcelona, onde uma rede de dutos liga diversos pontos de coleta de lixo na cidade até uma central, onde se encontram exaustores que criam a diferença de pressão necessária para deslocar os sacos de resíduos depositados pela população (SEOANE, 2012).

Também há dois outros tipos de dutovias: oleodutos e gasodutos. Oleodutos destinam-se ao transporte de petróleo e seus derivados e gasodutos de gás natural. Portanto, uma das principais diferenças técnicas destes sistemas reside do sistema de propulsão da carga. SANGINETO (2006) estende ao conceito de polidutos, quando produtos diversos podem ser transportados num mesmo duto.

Em determinados casos, o transporte em dutos envolve mais de uma fase, sendo denominado escoamento multifásico (ZHAO, 2005). Este pode ser um escoamento gás-sólido, gás-líquido, líquido-sólido ou gás-líquido-sólido.

Os dutos oriundos de poços petrolíferos, que transportam gás natural, petróleo e água de formação, simultaneamente, são exemplos encontrados atualmente.

Quanto à disposição topográfica da tubulação, conforme comenta MURTA (2003), pode ser classificada entre:

- terrestre, quando logo acima do solo;
- subterrânea, se estiver enterrada no solo;
- aérea, para pequenos trechos como travessias de rios; e
- submarina (no leito de lagoas ou oceanos).

Nas publicações citadas anteriormente, os diversos tipos de transporte em dutovias são apresentados, com suas significativas vantagens, quando comparados com outros modais. Entre elas, o baixo consumo de energia e emissão de poluentes, reduzida necessidade de mão de obra, independência de condições meteorológicas, maior confiabilidade e segurança. No entanto, também são levantadas suas desvantagens, o que torna as dutovias de aplicação muito restrita. A maior desvantagem pode ser determinada facilmente: os poucos tipos de carga aos quais se aplica.

LIU e RICHARDS (1994) apresentam as cápsulas hidráulicas (HCP – *Hydraulic Capsule Pipeline*) e as cápsulas pneumáticas (PCP – *Pneumatic Capsule Pipeline*) como soluções inovadoras, que permitem o transporte de diversos tipos de carga através de dutos, restringindo-as apenas a dimensões ligeiramente menores que o diâmetro interno do duto.

No Brasil, a dissertação de MURTA (2003), apresentou os tipos transporte encapsulados existentes e teve como enfoque o estudo dos impactos ambientais referentes à construção e operação de dutovias. Os aspectos abordados, certamente, servem para a análise dos impactos ambientais para o caso de cápsulas e a consequente comparação com os demais modais.

2.2.1. CÁPSULAS PNEUMÁTICAS (PCP)

As primeiras utilizações de PCP remontam ao século XIX. Em 1861, fora construído um túnel em Londres com cerca de 1 m de largura e 4 km de extensão para envio de cartas e pacotes, o qual operou com sucesso durante 7 anos. Um coletor de pó foi inventado, em 1886, para utilização em fábricas de madeira, o que levou a criação de uma empresa em Michigan/EUA especializada em sistemas de dutos pneumáticos baseado num carregador rotatório de formato cilíndrico vertical. (ASCE, 1998)

Outro notável exemplo foi o túnel para transporte de passageiros idealizado por Alfred Ely Beach, que foi construído nos EUA em 1870 (BEACH, 1870). O túnel ligava a Rua *Warren* à Rua *Murray* na *Broadway* com cerca de 90 m de comprimento e 2,4 m de diâmetro, tendo o objetivo de servir como demonstração da solução proposta por Beach para mobilidade urbana na época.

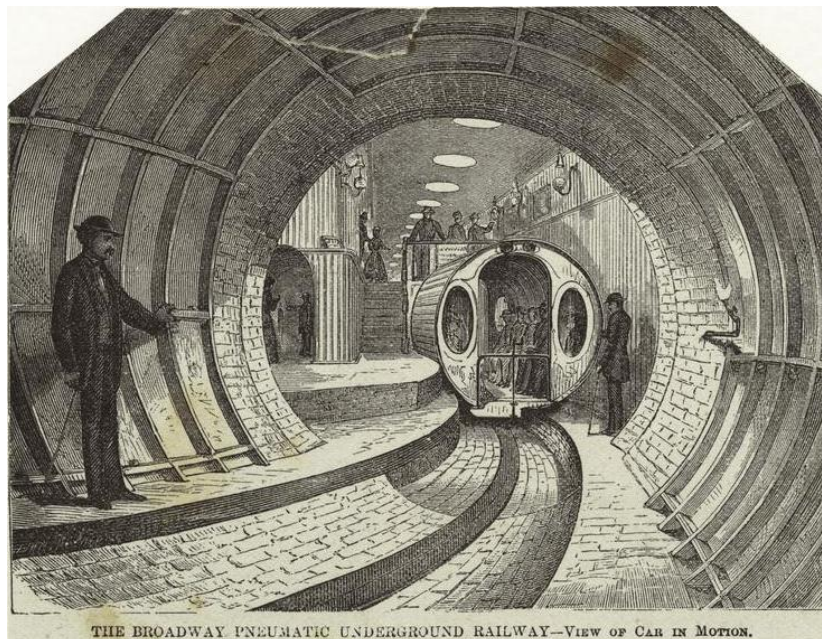


FIG. 2.1 Ilustração do túnel construído por Beach (KAEMPFERT, 1920)

Para a pressurização, era utilizado um grande compressor a vapor com 100 HP de potência que podia trabalhar tanto para compressão do ar, o que impulsionava o vagão num sentido, quando para exaustão, impulsionando o vagão no sentido

contrário. O sistema causou grande repercussão na imprensa e entre os cidadãos de Nova Iorque, mas funcionou durante apenas três anos, entre 1870 e 1873. Com a descoberta da eletricidade e posterior aplicação em vagões elétricos o invento de Beach não foi mais cogitado.

Embora desenvolvido desde 1859, o compressor rotativo de deslocamento positivo só se tornou popular em 1920, trazendo grande aprimoramento nos dutos pneumáticos. Em 1933, com auxílio de tanques de alta pressão, este sistema foi utilizado para transporte de cimento numa distância de 1,8 km no local de construção da represa *Hoover Dam* e outro de 2,1 km na represa de *Grand Coulee Dam*. No mesmo ano, após o fim da proibição de bebidas alcoólicas dos EUA, as fábricas cervejeiras foram as próximas a utilizarem esta tecnologia para o transporte de malte e grãos.

Atualmente, a utilização de PCP, em maior parte, está aplicada ao transporte de pequenas cargas como dinheiro em espécie, documentos, correspondências, peças e outros. No Brasil, seus clientes estão divididos entre indústrias, bancos, hospitais e supermercados, entre eles: rede de Hospitais D'or, Usiminas, Votorantin, Gerdau, Caixa Econômica Federal, Bradesco, Itaú, Cinemark, Carrefour, rede Drogasil e praças de pedágio de diversas concessionárias.



FIG. 2.2 PCP utilizado no *Friendship Hospital* – China (fonte: www.sumetzberger.com)

Outra vertente, de maior ênfase neste trabalho, é a utilização de PCP em maior escala para transporte de cargas pesadas a grandes distâncias. Neste caso, adotam-se maiores diâmetros (cerca de 1 metro) e utilizam-se cápsulas com rodas ou trilhos, com o intuito de reduzir o atrito com as paredes do duto. Para tais aplicações, pesquisas sobre PCP foram desenvolvidas pelos EUA, Canadá, antiga União Soviética e Inglaterra, nas décadas de 70 e 80. Porém, o Japão foi o único país que obteve sucesso na utilização de cápsulas pneumáticas para fins comerciais em diversas aplicações (LIU, 2006).



FIG. 2.3 Protótipo de PCP para transporte de brita em Ontário, Canadá. (fonte: www.capsu.org)

Nos anos 70, a companhia *Tubexpress Systems Inc.* construiu e testou, nos EUA, uma dutovia de PCP com cerca de 420 m e diâmetro de 90 cm, cujas cápsulas possuíam 2,1 m de comprimento. O sistema não foi utilizado comercialmente, pois melhorias eram necessárias para torná-lo mais competitivo com outros meios de transporte (ASCE, 1998). Na mesma década, na antiga União Soviética, fora construído o sistema Lilo-1, capaz de transportar 25 toneladas de areia e cascalho por vez num tubo de 2,1 km de comprimento e 1.020 mm de diâmetro com trens formados por seis cápsulas. Neste, foram relatadas velocidades de até 50 km/h. Um segundo sistema, Lilo-2, com 8 km de comprimento e 1.270 mm de diâmetro, transportava 8 milhões de toneladas por ano, mas acredita-se que ambos estão desativados atualmente. (CARTER e TROYANO-CUTURI, 2009).

Em 1980 a empresa japonesa *Sumitomo Metal Industries (SMI)* projetou e construiu um PCP com 1m de diâmetro e 3,2 km de extensão em Kuzuu, Japão,

para transportar calcário até uma fábrica de cimento. Na FIG. 2.4a, pode-se observar a instalação de entrada do sistema e uma unidade de carregamento rotatória, do tipo carrossel (FIG. 2.4b), onde as cápsulas são preenchidas com calcário. Os trens são lançados em intervalos de 50 segundos, compostos por três cápsulas, que possuíam rodas, contendo 1,6 toneladas de carga útil cada uma.



FIG. 2.4 PCP para transporte de calcário em Kuzuu, Japão. (LIU, 2006)

Este sistema foi adotado para evitar problemas de segurança e poluição sonora num vilarejo que seriam causados por outros tipos de transporte. Sua capacidade anual era de dois milhões de toneladas.

Outro exemplo, envolvendo também a SMI, foi a construção de um PCP durante a construção de um túnel em Akima, no Japão, com o objetivo de retirar o material escavado para o bota-fora e trazer concreto pré-misturado para o revestimento do túnel. Neste, as cápsulas possuíam seção quadrada de 1m x 1m, o que facilitou a construção do duto por meio de módulos pré-moldados de concreto (FIG. 2.5).

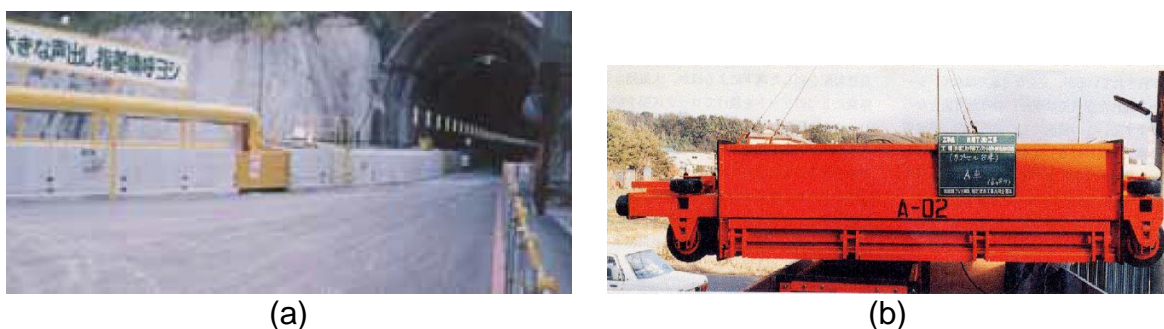


FIG. 2.5 Túnel Akima (a), duto por módulos pré-moldados e a cápsula (b) (LIU, 2006)

LIU e RICHARDS (1994) comentam os efeitos benéficos secundários da utilização do transporte encapsulado, como a redução da sobrecarga de outros modais, exemplificado pela diminuição da quantidade de veículos pesados nas rodovias. EGBUNIK e POTTER (2010) relatam que, de acordo com o London Assembly de 2003, retirar de operação o sistema subterrâneo de PCP para envio de correio significa colocar mais 80 vans nas ruas de Londres. Um estudo de viabilidade concluiu que a implementação de PCP reduziria em 70% a utilização de caminhões na cidade de Nova York (NYSERDA, 2004).

Alguns autores cogitaram o potencial da aplicação de transporte encapsulado para diversos tipos de cargas. Por exemplo, HODSON (2007), propôs que, no futuro, os alimentos deveriam ser transportados por dutos específicos de PCP, intitulando-os "*FoodTubes*". Ele afirma que, no Reino Unido, há quase 200 mil veículos pesados que transportam alimentos e que a implantação de PCP poderia tirar das rodovias boa parte deles, diminuindo o tráfego e o desgaste do pavimento. O autor afirma que, devido ao estado atual de exploração desta tecnologia, é difícil se fazer uma estimativa precisa de custo, mas garante que a total substituição pelo *FoodTubes* reduziria em 8% as emissões anuais de dióxido de carbono. Justificando e prevendo a dificuldade de se implantar a tecnologia proposta, o autor explica que a indústria de transporte de cargas está profundamente enraizada no governo e no comércio e exemplifica comentando que em 1969, nos EUA, ela interrompeu o transporte dos correios por PCP de 10 polegadas.

Em 1997, o Conselho de Engenharia do Reino Unido recomendou que deveria haver um aumento de dutovias, especialmente PCP, para resolver os problemas de transporte de lá. Porém, nenhuma pesquisa significativa foi publicada com o objetivo desde então, exceto por HOWGEGO e ROE (1998).

Em 2006, foi construído na Itália, por pesquisadores da Universidade de Perugia, um protótipo de um sistema de transporte de cargas com pequenos volumes em dutovias a altas velocidades e baixo atrito, constituindo um sistema intitulado "*Pipe&net*". As cápsulas poderiam ser dimensionadas para conter uma unidade padrão "*euro-pallet*", o que facilitaria a interligação com outros modais. Para propulsão, foram utilizados motores elétricos lineares síncronos que podem até

recuperar a energia cinética durante a desaceleração, aumentando a eficiência energética (EGBUNIKE, 2010).

Baseando-se em conclusões de outros autores, EGBUNIKE (2010) afirma que o planejamento e desenvolvimento de dutovias para transporte de carga não poderá ser executado totalmente pela iniciativa privada sem, ao menos, apoio legislativo, como direito de passagem dos dutos em propriedades privadas garantido por lei federal. Além disso, uma grande participação do governo seria um importante catalisador para a aceitação e implantação desta tecnologia, com incentivos fiscais, investimentos em pesquisa e subsídios financeiros para implantação de projetos.

Na política europeia, por exemplo, não é feita uma menção, especificamente, a dutos de carga em seus programas governamentais de desenvolvimento da infraestrutura de transporte e as inovações se restringem as redes já existentes.

No entanto, em determinadas regiões da Inglaterra, há documentos que já citam dutos de carga, como o *East Midlands Regional Assembly* em 2005 e o *Transport for London* em 2007.

Especificamente, no País de Gales, o *Welsh Assembly Government* (2008) afirma que “ideias futurísticas, incluindo o envio de carga sólida em contêineres envoltos por cápsulas cilíndricas ao longo de dutovias utilizando pneumática ou magnetismo, também foram sugeridas”, fazendo uma clara referência ao transporte encapsulado.

2.2.2. CÁPSULAS HIDRÁULICAS (HCP)

A primeira proposta de HCP surgiu durante a 2ª Guerra Mundial por Jeffrey Pyke para transportar materiais bélicos da China para Burma (LUMP, 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).

Quando o fluido utilizado para escoamento das cápsulas é a água, as velocidades aplicáveis são muito inferiores, não passando de 3 m/s, devido às forças viscosas desenvolvidas entre a parede interna do duto e a cápsula em velocidades elevadas. Por outro lado, a pressurização se torna mais fácil e eficiente, por se tratar de um fluido, praticamente, incompressível, possibilitando a transposição de grandes distâncias e aclives sem a necessidade de bombeamento intermediários, como no caso pneumático.

A utilização mais conhecida de HCP são os CLP (*Coal Log Pipeline*), que são cápsulas formadas por carvão comprimido em formato cilíndrico (FIG. 2.6), 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 permite a duplicação da capacidade de transporte.

Desenvolvido e amplamente pesquisado pelo CPRC (*Capsule Pipeline Research Center*) na Universidade de Missouri-Columbia os CLPs 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.

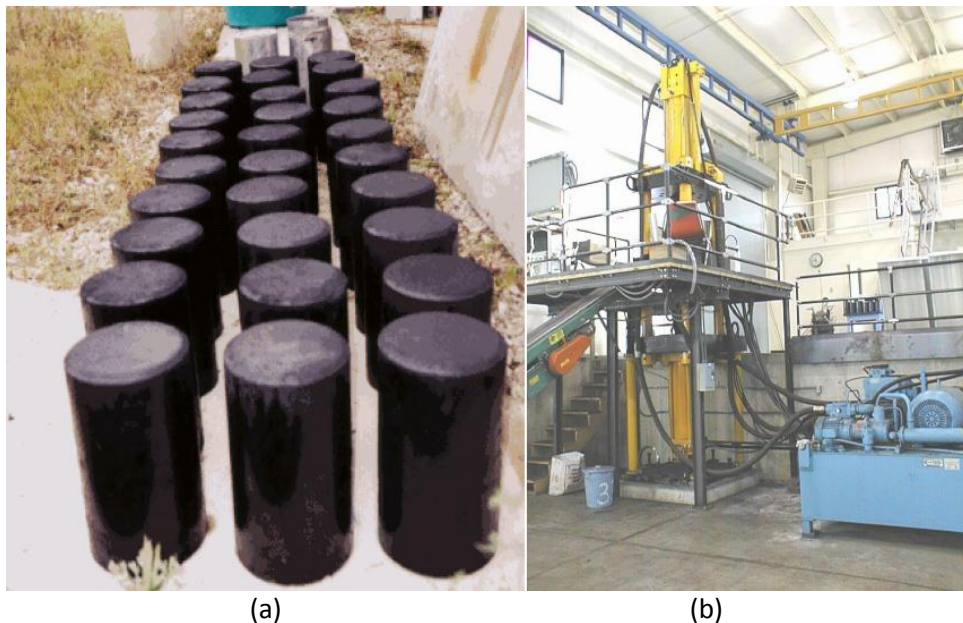


FIG. 2.6 CLPs (a) e máquina de compactação das cápsulas (b). (LIU, 2006)

Estudos mostram que sua aplicação é viável para distâncias entre 50 e 2.000 km (ASCE, 1998). Embora diversas pesquisas tenham demonstrado a eficiência e viabilidade desta tecnologia, ela nunca chegou a ser utilizada comercialmente.

Diversos outros materiais são cogitados para transporte via HCP de maneira análoga ao CLP, incluindo coque de petróleo, cinza volante, certos minerais e rejeitos de minas, pois testes de laboratório mostram que podem ser compactados em formas a prova d'água e resistente ao desgaste (LIU, 2000). Assim, outra aplicação de HCP seria o transporte de resíduos sólidos compactados de indústrias ou centros urbanos para locais de descarte.

O HCP se torna mais viável quando o produto a ser transportado possibilita sua aplicação sem a utilização de cápsulas contêineres. Caso seja necessária a utilização de cápsulas contêineres, o PCP se torna mais atrativo, dada sua maior velocidade e a dispensa do uso de água. Por este motivo, não se utiliza o HCP com cápsulas contêineres, com ou sem rodas, restringindo-se à sua utilização para os tipos de cargas mencionadas.

2.3. ASPECTOS ECONÔMICOS

Não há divulgação de custos finais para os poucos locais onde foram implantados e utilizados sistemas de HCP ou PCP, citados no Capítulo 1. HOWGEGO e ROE (1998) afirmam que há dificuldade em encontrar as possíveis fontes de custo para este sistema, devido a grande variabilidade de aplicações e o seu pouco desenvolvimento. E ainda, enfatizam que o custo de muitos fatores envolvidos numa análise abrangente de transporte em dutos podem ser considerados intangíveis.

De acordo com a ASCE (1998), análises de viabilidade econômica, com estimativas de custos baseados no ano de 1993, para um período de retorno de 10 anos e taxa de juros de 15%, mostraram que o custo de transporte via PCP seria, nas condições mais favoráveis, US\$ 70 por 10^3 t x km. Segundo a referida publicação, este custo não seria favorável quando comparado com outros modos de transporte, porém a consideração de outros fatores (e.g.: impacto ambiental,

redução de tráfego) e um maior desenvolvimento desta tecnologia poderiam torná-la economicamente atrativa. A exemplo disto, LIU (2000) menciona que a utilização de LIM (*Linear Induction Motor*) como sistema de propulsão pode aumentar em grande quantidade a capacidade de transporte do PCP, o que, conseqüentemente, acarretaria na diminuição de seu custo unitário (US\$ / t.km) e o tornaria atrativo frente aos outros tipos de transporte convencionais.

Em 2004, Henry Liu concluiu um estudo contratado pelo *New York State Energy Research and Development Authority* (NYSERDA) no qual analisou a viabilidade de transporte pneumático subterrâneo na cidade de Nova York, objetivando, principalmente, seis aplicações: construção de túneis, transporte de resíduo sólido municipal, transporte de correspondências e encomendas entre as cinco cidades vizinhas, transporte de mercadorias, despacho de contêineres até os portos e transporte de alimentos. Foi concluído que as primeiras cinco aplicações seriam mais rentáveis que o transporte por caminhões, utilizado atualmente. Porém, o autor garantiu que todas as seis aplicações seriam tecnicamente viáveis e trariam diversos benefícios para a cidade, como redução da poluição do ar, engarrafamentos e acidentes de trânsito (NYSERDA, 2004).

Em outro trabalho, LIU *et al.* (1998) calcula a previsão de custos para o transporte de carvão por CLP, baseando-se nos conhecimentos adquiridos em pesquisas anteriores (citadas anteriormente neste capítulo) e incluindo uma taxa de retorno de 15% para os investidores, além de juros e impostos aplicados na região para aquela época. Então, são comparados os custos calculados com os cobrados por outros modos de transporte.

É concluído que o CLP seria mais barato que o transporte por caminhões, exceto para pequenas distâncias (abaixo de 60 km) e pequenas vazões (abaixo de 2,3 milhões t/ano). Quanto aos minerodutos que transportam na proporção 50% (razão carvão-água em peso), LIU *et al.* (1998) afirma que o CLP é significativamente mais econômico, principalmente para distâncias menores que 160 km, e ainda acrescenta o fato de utilizar menos água e transportar o carvão numa forma já pronta para uso (compactado em cápsulas).

Em comparação aos trens, na referida publicação, é afirmado que o CLP só seria mais econômico para elevadas quantidades (na ordem de 16,7 milhões t/ano). No entanto o autor argumenta que alguns fatores não considerados poderiam tornar o CLP mais atrativo que o transporte por trens, entre eles: o caminho mais curto que pode ser percorrido por tubulações em relação à linha férrea; os gastos de carga e descarga não inclusos nos custos do transporte por trem, porém já inclusos no caso do CLP.

Além disso, o investimento no caso da necessidade de um novo destino ou nova origem, pois os custos da instalação de nova rede já foram computados na previsão do CLP, mas não são considerados no preço aplicado para trens, uma vez que as linhas férreas já existem há muitos anos.

Seguindo o mesmo raciocínio, EGBUNIKE (2010) também argumenta que os modos de transporte convencionais e amplamente utilizados já tiveram suas redes instaladas, o que agrava, competitivamente, a questão dos elevados investimentos iniciais necessários para a implantação do transporte encapsulado. Ou seja, analisando-se num horizonte de curto prazo, os transportes convencionais, embora que menos eficientes e mais poluidores, são mais atrativos para os investidores imediatistas. Adicionalmente, deve-se realizar um estudo aprofundado para otimização da cadeia de suprimentos e conectividade entre modais, uma vez que os pontos de carga e descarga dos dutos são fixos, diferentemente do modal rodoviário.

CARTER e TROYANO-CUTURI (2010) afirmam que, para um diâmetro de 1350 mm e com a utilização de LIMs, um sistema PCP seria capaz de transportar 20 milhões de toneladas de agregados por ano. Nas distâncias entre 2 e 350 km o PCP seria mais econômico que os demais modais, com um custo unitário em torno de US\$ 22 / mil TKU.

2.4. ASPECTOS TÉCNICOS

2.4.1. CÁPSULAS PNEUMÁTICAS (PCP)

É importante salientar que o comprimento de cada cápsula está limitado à sua capacidade de percorrer trechos em curvas. Portanto, para manter uma boa relação entre raio mínimo de curvatura da rede e o volume transportado, adota-se o acoplamento de duas ou mais cápsulas formando uma composição.

No entanto, o fator mais crítico para capacidade do sistema é o tempo de carga/descarga das cápsulas, pois vai definir a distância entre as composições e para as cargas cogitadas nas pesquisas desenvolvidas podem variar entre 20 e 60 segundos, dependendo das dimensões da cápsula, do material a ser transportado e o método.

Assim, considerando-se que o sistema funciona continuamente, o comprimento do duto não interfere diretamente na capacidade de transporte, mas sim na perda de pressão ao longo da linha e, conseqüentemente, na pressão necessária a ser gerada pela turbina ou utilização de motores intermediários.

Outra empresa japonesa que desenvolveu pesquisa em PCP foi a *Nippon Steel Corporation* (NSC). Na tentativa de promover esta tecnologia, por volta de 1980, esta empresa divulgou um estudo de capacidade de transporte para materiais densos (massa específica entre 1,0 e 2,0 t/m³) e seus respectivos diâmetros para configuração mais econômica, conforme a TAB. 2.1.

TAB. 2.1 Capacidade de transporte do PCP

| Capacidade (toneladas/ano) | Diâmetro (mm) |
|--------------------------------------|-------------------------|
| 1 milhão | 600 – 1.000 |
| 2 milhões | 800 – 1.200 |
| 5 milhões | 1.000 – 1.400 |

(Disponível: <http://www.capsu.org/library/documents/0039.html#contents>
Acessado em 11 jul. 2012)

De acordo com a ASCE (1998), a extinta TUBEXPRESS™ desenvolveu um modelo matemático simplificado para PCP, considerando uma declividade constante entre terminais, fluxo permanente do ar e das cápsulas e que o ar se comporta como um gás ideal. Um programa para cálculo econômico e outro de simulação operacional também foram criados pela referida empresa.

As cápsulas desenvolvidas pela TUBEXPRESS™ possuíam quatro rodas de borracha em cada ponta, dispostas em 90° uma da outra. O atrito da borracha das rodas com as paredes internas do duto mantém a cápsula com abertura voltada para cima.

Uma alternativa com rodas de aço foi considerada, com o intuito de se reduzir o atrito, no entanto isso causaria um aumento do ruído, o que não seria um problema para dutos subterrâneos ou submarinos.

Uma vedação flexível é colocada na traseira da cápsula para aumentar o coeficiente de arrasto. Esta vedação é ligeiramente menor que o diâmetro interno do duto, para evitar atrito com a parede interna. As soldas devem ser feitas externamente, para manter um encaixe suave entre segmentos de tubos. A cápsula é direcionada a uma ponta seca na extremidade da dutovia e o ar é retirado pelo topo do tubo num caminho separado. Nesta abertura, o ar pode ser tanto retirado por um exaustor (cápsula chegando) quanto comprimido para o interior do duto (cápsula saindo).

Numa primeira concepção, as cápsulas eram deslocadas e carregadas em grupos (trens) de quatro, levando 30 s, o que era equivalente a um *headway* de 7,5 s. Depois, passou a ser utilizado o sistema de “carrossel” (carregador de mesa giratória), que reduziu o tempo entre cápsulas para 3,5 s. Para tal, a cápsula é desacelerada por uma correia condutora mais lenta que ajusta a velocidade da cápsula à do carrossel de carregamento ou descarregamento. Os compressores utilizados eram do tipo *roots* movidos por motores elétricos e podiam tanto trabalhar como sopradores de ar para o interior quanto exaustores para o exterior (ASCE, 1998).

Um dos fatores críticos do sistema de PCP são as turbinas necessárias para gerar aumento/diminuição da pressão na linha. Os tipos de turbina disponíveis

atualmente são ineficientes para esta aplicação, uma vez que se necessita de pressão e vazão, simultaneamente. No intuito de se melhorar a eficiência do sistema, estudos recentes (e. g. PLODPRADISTA, 2010) propõem a utilização de *Linear Induction Motors* (LIMs), ilustrado na FIG. 2.7, ao invés das turbinas convencionais.

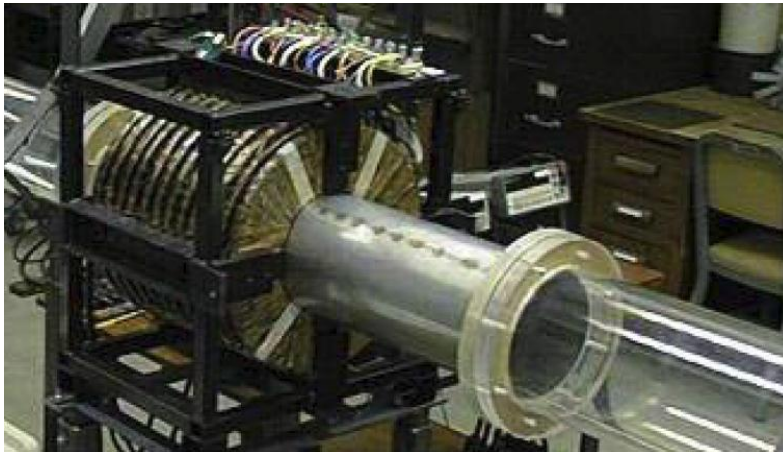


FIG. 2.7 LIM em menor escala para duto de 8" (PLODPRADISTA, 2010)

O LIM constitui-se basicamente de bobinas posicionadas externamente ao duto que geram campos magnéticos no seu interior, impulsionando as cápsulas (desde que estas tenham alguma parte metálica). Assim, ao ser impulsionada no trecho de atuação do LIM, a cápsula gera pressões maiores na sua frente e menores na retaguarda, conseqüentemente, contribuindo para o movimento das cápsulas anteriores e posteriores. Este dispositivo permite ainda que seja instalado em pontos intermediários da tubulação, tornando possível a transposição de grandes distâncias entre os pontos de carregamento e descarregamento.

Na TAB. 2.2 são apresentados os valores, ou faixa de valores, mais utilizados em projetos de cápsulas pneumáticas. Destaca-se a variabilidade do diâmetro, para o qual é adotado desde 3", referente ao transporte de pequenos objetos, até 48", utilizado no caso de agregados e outros materiais densos. Quanto ao sistema de pressurização, há a possibilidade de se utilizar apenas um compressor na extremidade de carregamento (origem) ou também um exaustor na extremidade de descarregamento (destino).

TAB. 2.2 Valores usuais para parâmetros de PCP (WEAVER, 2012)

| Parâmetro | Valores usuais |
|---|-------------------------|
| Diâmetro | 3" até 48" |
| Velocidade | 4 m/s até 15 m/s |
| Quantidade de cápsulas por trem | até 5 |
| Raio de curvatura mínimo | 50 x (Diâmetro interno) |
| Pressão de operação (1 compressor) | 15 psi |
| Pressão de operação (1 compressor + 1 exaustor) | 21 psi |

2.4.2. CÁPSULAS HIDRÁULICAS (HCP)

Em uma das suas primeiras publicações, LIU e GRAZE (1983) realizou experimentos onde media a pressão em 32 pontos de uma cápsula fixa no interior de um tubo. Desta maneira, a partir do gradiente de pressões obtido nas medições, foi possível se obter os coeficientes de levantamento e arrasto sofridos pela cápsula com o escoamento da água. Ele concluiu que a força de empuxo se concentrava na cauda da cápsula (extremidade de montante), o que tenderia ao levantamento da parte traseira da cápsula assim que se iniciasse seu movimento devido ao aumento do fluxo de água. As dimensões da cápsula e tubo foram adotadas de acordo com o que era, na época, a previsão para futura utilização comercial. Porém, o autor argumenta que embora tenha sido feito medições apenas para uma dimensão de cápsula e uma única vazão, os resultados, convertidos para adimensionais, poderiam ser utilizados para outras dimensões e vazões por aproximação, desde que o escoamento permanecesse turbulento e as proporções de dimensões fossem as mesmas. Ao final, é apontada a necessidade de se investigar os efeitos do espaçamento entre cápsulas. Uma falha que se pode observar no referido trabalho, é que para o cálculo do coeficiente de arrasto, não são consideradas as tensões viscosas, uma vez que são feitas somente medições de pressão ao redor da cápsula.

Para a compreensão do fenômeno hidráulico e conseqüente previsão da perda de carga provocada pela cápsula, LIU (1992) concluiu que, com as ferramentas

matemáticas e computacionais disponíveis na época, era necessário dividir-se o fluxo de água em quatro regimes distintos, conforme a FIG. 2.8.

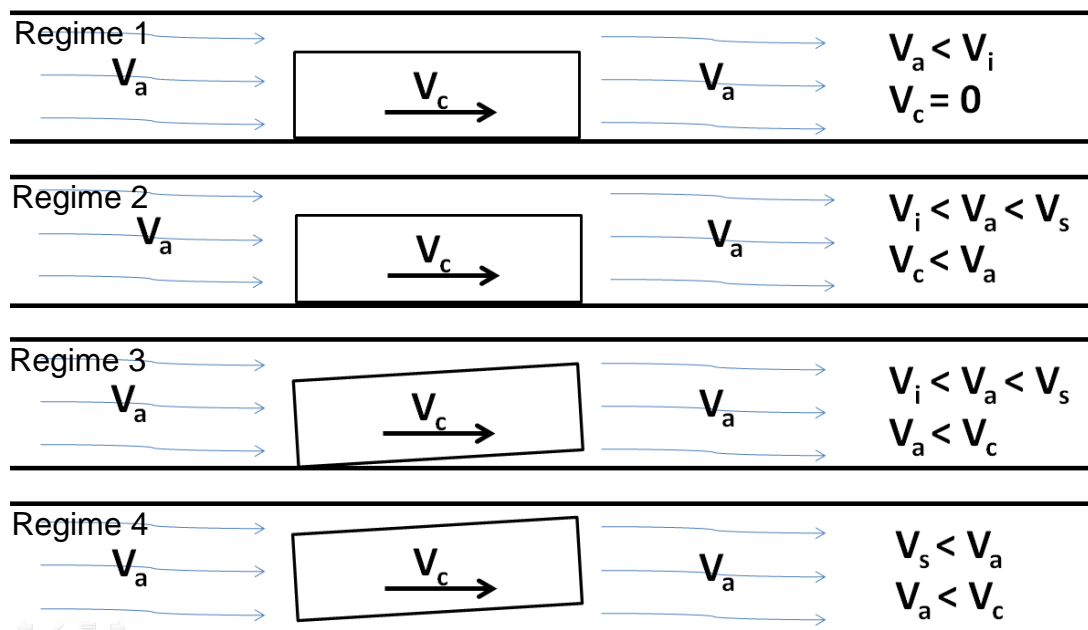


FIG. 2.8 Regimes do escoamento em HCP

O autor define como velocidade incipiente (V_i) a velocidade média assumida pelo fluido (água), a partir da qual a cápsula vence o atrito e começa a se mover e velocidade de sustentação (V_s) a velocidade média do fluido a partir da qual a cápsula flutua (força de empuxo igual ou superior ao peso), perdendo totalmente o contato com a parte inferior do duto. Então, são definidos os seguintes regimes:

- Regime 1: a velocidade do fluido (V_a) é inferior à velocidade incipiente (V_i), consequentemente, a cápsula não se move;
- Regime 2: a velocidade do fluido (V_a) é superior à velocidade incipiente, porém inferior à velocidade de sustentação (V_s), então a cápsula move se apoiando na parte inferior do duto. A velocidade da cápsula (V_c) ainda é inferior à velocidade média do fluido ($V_c < V_a$);
- Regime 3: Em relação ao regime 2, a velocidade média do fluido (V_a) aumenta a tal ponto, que a redução do atrito, devido ao aumento do empuxo, permite que a cápsula se desloque com velocidade ligeiramente superior a média do fluido ($V_c > V_a$). Porém, a velocidade média do fluido ainda é inferior a velocidade de sustentação ($V_a < V_s$) e a cápsula se arrasta no fundo do duto.

- Regime 4: Neste caso, a velocidade média do fluido é superior a velocidade de sustentação ($V_a > V_s$) e a cápsula flutua, perdendo totalmente o contato com a parte inferior do duto. A velocidade da cápsula passa a ser significativamente superior a do fluido (de 15 a 20%).

RICHARDS (1992) realizou experimentos onde mediu, através de um hidrômetro magnético, a velocidade média do fluido a partir da qual a cápsula, com densidade superior a da água, se movia no interior de um duto. O movimento da cápsula se dava quando a força de arrasto horizontal incidida pelo fluido na cápsula era maior que o atrito estático entre esta e a parede interior do duto. Foram utilizados dois tipos de material para a cápsula: acrílico e carvão. As cápsulas de acrílico feitas a partir do corte de barras do referido material e as de carvão de uma extrusão da mistura de carvão e cera na forma de cilindros. O procedimento foi realizado para sete combinações de dimensões de cápsulas (quatro de acrílico e três de carvão), ou seja, sete diferentes razões entre diâmetro da cápsula e do duto (parâmetro k) e entre comprimento da cápsula e seu diâmetro (parâmetro a). Com o intuito de se alcançar uma maior precisão, o experimento fora repetido sete vezes para cada caso, adotando-se como resultado a média obtida.

Pouco mais tarde, LIU e RICHARDS (1994), desenvolveram uma fórmula baseada na equação unidimensional da energia, na equação da quantidade de movimento e da continuidade para previsão da variação da pressão ao longo da cápsula em repouso no duto. Eles estenderam a teoria para a determinação do arrasto e empuxo na cápsula, sendo possível se determinar a velocidade incipiente, ou seja, quando a força exercida pelo fluido, devido à diferença de pressão (antes e após a cápsula) e a força viscosa (cisalhante) supera o atrito estático. A equação final apresentada para a determinação da velocidade incipiente foi:

$$V_i = \sqrt{\frac{2g(d-1)L_c\eta}{\eta C_L + C_p - 1 + b^2 \left[\frac{(k\phi_1 + 1)}{k(k + \phi_1)} \right] \left[\alpha(1 + K_{en}) + f_a \left(\frac{L_c - L_1}{D - D_c} \right) \right] - \frac{b^2(1 - k^2)}{k(k + \phi_1)} }}, \quad \text{EQ. 2.1}$$

onde d e L_c são a densidade e o comprimento da cápsula, η é o coeficiente de atrito estático, k é a razão entre o diâmetro da cápsula D_c e o diâmetro do duto D , f_a é o

fator de atrito de *Darcy-Weisbach* na região anular, K_{en} é o coeficiente da perda de carga de entrada definido por

$$K_{en} = \left(\frac{1}{C_c} - 1 \right)^2, \quad \text{EQ. 2.2}$$

onde C_c é o coeficiente de contração, obtido experimentalmente, que prevê a redução da seção causada pelo descolamento do escoamento na entrada e L_1 corresponde ao comprimento da zona onde este descolamento ocorre, medido a partir da extremidade da cápsula à montante. Este valor é aproximado por

$$L_1 = 3(D - D_c). \quad \text{EQ. 2.3}$$

O parâmetro b é razão de obstrução, determinado pela divisão entre a área interna do tubo e a área da seção livre na região da cápsula, ou melhor,

$$b = \frac{1}{1 - k^2}. \quad \text{EQ. 2.4}$$

O fator alfa α se refere à correção da equação da energia unidimensional e ϕ_1 é a razão entre a tensão de cisalhamento na parede do tubo e na superfície da cápsula. Ambos são determinados experimentalmente e representados por

$$\alpha = 1 + 0.193k + 0.0763k^3 \quad \text{EQ. 2.5}$$

e

$$\phi_1 = \frac{\tau_p}{\tau_c} = \sqrt{1 - (1 - k)^2}. \quad \text{EQ. 2.6}$$

C_L e C_p são os coeficientes de levantamento e pressão, respectivamente, sendo determinados a partir de experimentos e então considerados constantes e igual a 0,96 e 0,8, respectivamente.

Pode-se observar que, apesar de se tratar de uma equação baseada em fundamentos teóricos, a mesma depende de uma série de fatores ajustados experimentalmente. Portanto, sua confiabilidade fica sujeita a correta determinação desses valores.

Os resultados da equação final foram comparados com os dados do experimento realizado por RICHARDS (1992) e apresentaram diferenças significativas, que podem ser observadas na TAB. 2.3. O diâmetro interno da tubulação utilizada era de 54 mm.

TAB. 2.3 Comparação entre dados experimentais e teóricos

| Caso | Materia l da cápsula | Geometria da cápsula | | Fator de atrito | | Velocidade Incipiente (m/s) | | |
|------|----------------------|------------------------------------|-----------------------|-----------------|-----------------|-----------------------------|------------|-----------|
| | | a = L _c /D _c | k = D _c /D | Médi a | Desvi o Padrã o | Medid a | Calculad a | Erro (%) |
| 1 | acrílico d=1,176 | 2,667 | 0,884 | 0,404 | 0,0302 | 0,066 | 0,063 | -4,5 |
| 2 | | 1,300 | 0,884 | 0,421 | 0,0523 | 0,047 | 0,048 | 2,1 |
| 3 | | 4,073 | 0,695 | 0,453 | 0,0520 | 0,224 | 0,188 | - 16,1 |
| 4 | | 2,053 | 0,695 | 0,476 | 0,0378 | 0,164 | 0,141 | - 14,0 |
| 5 | carvão d=1,174 | 3,792 | 0,858 | 0,569 | 0,0262 | 0,092 | 0,102 | 10,9 |
| 6 | | 1,861 | 0,858 | 0,513 | 0,0339 | 0,066 | 0,076 | 15,2 |
| 7 | | 1,295 | 0,858 | 0,530 | 0,0317 | 0,053 | 0,062 | 17,0 |

A fronteira entre os regimes 2 e 3 é determinada pela velocidade crítica (V₀). A formulação empírica

$$V_0 = \sqrt{\frac{2g(d-1)L_c (\eta \cos \alpha + \text{sen} \alpha)}{k a f_{a,b}}} \quad \text{EQ. 2.7}$$

foi apresentada por LIU (2005) para determinar o valor de V₀. Nesta equação, α é a declividade do tubo e os outro fatores são os mesmos da EQ. 2.1.

Quanto à passagem do regime 3 para o regime 4, que é caracterizada pelo momento que a velocidade média do fluido atinge a velocidade de sustentação (V_s), LIU (2005) apresenta a seguinte fórmula empírica:

$$V_s = 7,2 \sqrt{(d-1)g a k (1-k^2) D} \quad \text{EQ. 2.8}$$

onde d é a densidade da cápsula, g a gravidade, a é a proporção entre comprimento e diâmetro da cápsula e D é o diâmetro interno do tubo. Esta fórmula baseia-se no coeficiente de levantamento, pelo qual se calcula a força de levantamento, que

somada ao empuxo deve ser maior que o peso, caracterizando a situação em que a cápsula perde o contato com o fundo do tubo, ficando totalmente sustentada pelo fluido.

Abordando uma situação que seria classificada como regime 4, FUJIWARA *et al.* (1994) desenvolveram um modelo matemático, resolvendo a equação do escoamento pelo método das características para se prever o movimento da cápsula ao longo do duto, além de possíveis choques entre cápsulas subsequentes, que ocorrem quando as cápsulas possuem massas diferentes. O modelo assumia um escoamento unidirecional e que a cápsula era sustentada por rodas que garantiam um movimento concêntrico da cápsula em relação ao tubo. Os resultados se mostraram muito próximos daqueles obtidos experimentalmente.

LENAU e EL-BAYYA (1996), desenvolveram dois modelos matemáticos para o fluxo transiente e movimento da cápsula, assumindo as mesmas hipóteses simplificadoras consideradas por FUJIWARA *et al.* (1994). Porém, quanto a cápsula, o primeiro modelo a considerava como um sólido de comportamento elástico e o segundo como um corpo rígido, ao invés de uma massa pontual. Os autores concluíram seus dois modelos apresentaram resultados próximos um do outro, porém divergiram daqueles encontrados por FUJIWARA *et al.* (1994).

No entanto, ambos estudos realizados por FUJIWARA *et al.* (1994) e LENAU e EL-BAYYA (1996) não se aplicam aos CLPs nem a maioria dos HCPs, pois consideram a utilização de rodas nas cápsulas, o que não é comum. Esta consideração interfere diretamente na posição da cápsula no duto, pois deixa de ser concêntrica, e no comportamento da força de atrito.

Posteriormente, GAO (2000) fez melhorias na equação apresentada por LIU e RICHARDS (1994) que incluíam:

- uma fórmula mais adequada para a determinação do coeficiente de levantamento, determinação mais precisa do coeficiente de atrito:

$$C_L = 0,95 + \frac{\exp(-a^{1,15})}{2,75(1-k^2)^2}; \quad \text{EQ. 2.9}$$

- a utilização de um coeficiente de contração maior que os aplicáveis à cápsulas com arestas vivas;
- valores mais precisos para a razão diametral entre cápsula e duto;
- um coeficiente de *Darcy-Weisbach* maior que o aplicável à dutos hidraulicamente lisos, porém, segundo o autor, este tem pouca influência no valor final de V_i ;
- modificações para previsão da velocidade incipiente para composições de cápsulas (trens).

A comparação entre resultados podem ser observada na TAB. 2.4.

TAB. 2.4 Comparação entre dados experimentais, resultados teóricos anteriores e revisados

| Caso | Material da cápsula | Geometria da cápsula | | Velocidade Incipiente (m/s) | | |
|------|---------------------|----------------------|---------------|-----------------------------|--------------------------|--------------------------|
| | | $a = L_c / D_c$ | $k = D_c / D$ | Experimental ⁽¹⁾ | Calculada ⁽²⁾ | Calculada ⁽³⁾ |
| 1 | acrílico | 2,667 | 0,884 | 0,066 | 0,063 | 0,058 |
| 2 | acrílico | 1,300 | 0,884 | 0,047 | 0,048 | 0,046 |
| 3 | acrílico | 4,073 | 0,695 | 0,224 | 0,188 | 0,182 |
| 4 | acrílico | 2,053 | 0,695 | 0,164 | 0,141 | 0,139 |
| 5 | carvão | 3,792 | 0,858 | 0,092 | 0,102 | 0,097 |
| 6 | carvão | 1,861 | 0,858 | 0,066 | 0,076 | 0,071 |
| 7 | carvão | 1,295 | 0,858 | 0,053 | 0,062 | 0,061 |

⁽¹⁾ RICHARDS (1992)

⁽²⁾ LIU e RICHARDS (1994)

⁽³⁾ GAO (2000)

Como se pode observar, a fórmula revisada apresentou resultados mais próximos aos experimentais para os casos em que a cápsula era de carvão (casos 5, 6 e 7). Porém, o contrário ocorreu para os casos onde a cápsula era de acrílico.

Outro autor, FENG (1995), numa modelagem computacional bidimensional que, por simplificação, assumiu um formato elíptico para as cápsulas, concluiu que tal fenômeno seria dividido apenas em três regimes: o levantamento inicial, oscilações transientes e sustentação permanente. O comportamento da cápsula foi analisado apenas para os dois primeiros regimes e esta análise foi baseada no estudo da distribuição da pressão e tensão viscosa ao redor da cápsula.

Para CLPs, um caso específico do HCP, avanços também foram realizados no desenvolvimento de cápsulas de carvão compactado resistentes à água e ao desgaste. CHENG (1994) mostrou que, após percorrer o equivalente a 274 km (em ciclos em teste de laboratório), a cápsula havia perdido menos de 4% de seu peso. Aquecimento elevado no momento da compactação e utilização de emulsão asfáltica como adesivo são opções para diminuir a perda de massa. Ainda segundo o autor, o custo para criar tais cápsulas de carvão compactado era inferior à US\$ 3,0 por tonelada de carvão e absorção de água é pequena. Vários experimentos foram feitos para determinar as condições de menor perda de massa e foi constatado que isso ocorre quando a velocidade do fluido opera entre 80% e 85% da velocidade de sustentação ($0,80V_s < V_a < 0,85V_s$). Como a cápsula se desloca arrastando sua parte inferior de trás, um formato chanfrado nesta área ajuda a reduzir ainda mais as perdas por desgaste. A razão entre o diâmetro interno do duto e o diâmetro da cápsula também influencia no desgaste, mostrando que razões maiores que 1,6 resultam em menor desgaste.

KHALIL *et al.* (2009) realizou a modelagem computacional em regime permanente de uma cápsula hidráulica, reproduzindo as mesmas condições do experimento de LIU e GRAZE (1983). O objetivo principal do autor foi obter os valores dos coeficientes de levantamento e arrasto. Os coeficientes resultantes foram muito próximos aos dados experimentais, assim como outros aspectos do escoamento como comprimento da zona de separação e a distribuição de pressões na cápsula. No entanto, resumidamente, o trabalho pode apenas confirmar os coeficientes calculados com base nas observações experimentais.

TAB. 2.5 Exemplos de valores para as velocidades

| Diâmetro do tubo | Proporções | | Diâmetro da cápsula | Comprimento da cápsula | Velocidade | | |
|--------------------|------------|-------------|---------------------|------------------------|------------|---------|-------------|
| | | | | | Incipiente | Crítica | Sustentação |
| | $k=D_c/D$ | $a=L_c/D_c$ | (m) | | (m/s) | | |
| 8 pol / 0,203 m | 0,800 | 3,232 | 0,162 | 0,525 | 0,253 | 3,84 | 4,11 |
| | 0,862 | 3,000 | 0,175 | 0,525 | 0,172 | 3,04 | 3,46 |
| | 0,862 | 3,792 | 0,175 | 0,664 | 0,189 | 3,04 | 3,89 |
| 9 pol / 0,227 m | 0,800 | 3,232 | 0,183 | 0,591 | 0,268 | 4,15 | 4,34 |
| | 0,862 | 3,000 | 0,197 | 0,591 | 0,184 | 3,31 | 3,67 |
| | 0,862 | 3,792 | 0,197 | 0,747 | 0,201 | 3,31 | 4,12 |
| 10 pol / | 0,800 | 4,310 | 0,203 | 0,876 | 0,320 | 4,47 | 5,28 |

| | | | | | | | |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|
| 0,254 m | 0,862 | 4,000 | 0,219 | 0,876 | 0,218 | 3,57 | 4,46 |
| | 0,862 | 5,000 | 0,219 | 1,09 | 0,237 | 3,57 | 4,99 |

Valores da velocidade incipiente, crítica e de sustentação, calculados para exemplos diferentes, são apresentados na TAB. 2.5. Nesses casos hipotéticos, foi considerado o atrito médio obtido para as cápsulas de carvão igual a 0,537. Pode-se observar que, de acordo com a EQ. 2.7, a velocidade crítica (V_0) independe do comprimento da cápsula. No entanto, mesmo para proporções diametraes (k) iguais, as velocidades tendem a aumentar conforme são maiores os diâmetros do tubo.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1. INTRODUÇÃO

O foco do presente estudo se concentra na previsão do comportamento da cápsula, conhecimento necessário para a determinação da capacidade de transporte de todo o sistema e dados de projeto, como diâmetro da tubulação e sistema de propulsão (bombas ou compressores). No entanto, para prever o comportamento da cápsula de forma precisa, é fundamental se conhecer o comportamento do fluido no qual ela está inserida com precisão e, conseqüentemente, os esforços que lhe são aplicados.

Portanto, neste capítulo, será apresentada a teoria necessária para o estudo do comportamento do fluido escoando pelo tubo e ao redor da cápsula. Esta teoria pode ser dividida em duas etapas: as equações da mecânica dos fluidos e o modelo de turbulência. Este último pode ser definido como uma ferramenta que possibilita o cálculo de uma solução aproximada para as equações primeiramente definidas, que regem o comportamento do fluido em estudo.

3.2. EQUAÇÕES DA MECÂNICA DOS FLUIDOS

A teoria necessária para o estudo do comportamento dos fluidos está inserida na mecânica dos fluidos, um dos campos da ciência exata de aplicação mais compartilhada entre as diversas especialidades como engenharia mecânica, aeronáutica, civil, química, etc. A mecânica dos fluidos se baseia em quatro princípios: conservação da massa (continuidade), quantidade de movimento linear, quantidade de movimento angular e energia. Tais princípios são complementados

pelas relações de estado, que, basicamente, apresentam a pressão e energia como funções da massa específica e temperatura do fluido.

As equações diferenciais que serão apresentadas a seguir são consequência direta desses princípios. Estas se aplicam a qualquer ponto (partícula) de todo domínio, se fundamentando na hipótese do contínuo, que considera o fluido uma matéria contínua, ao invés de moléculas que colidem umas com as outras. Esta hipótese divide o fluido em partículas pequenas o suficiente para que se possa assumir a continuidade das propriedades do fluido e, por outro lado, grandes o suficiente para conter um número estatisticamente elevado de moléculas.

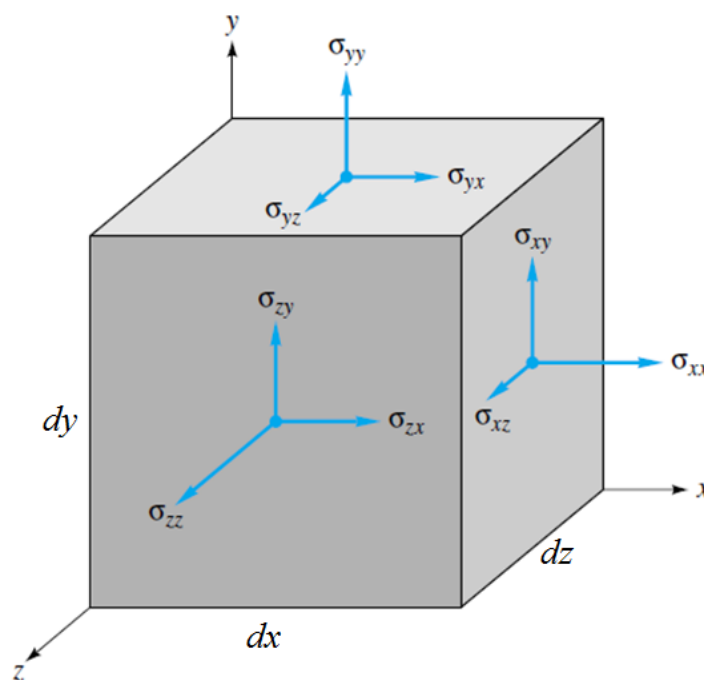


FIG. 3.1 Fluido compreendido por um cubo infinitesimal (WHITE, 2006)

Tais equações são apresentadas a seguir (WHITE, 2006).

Equação diferencial da conservação da massa (continuidade):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = \frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{V}) = 0, \quad \text{EQ. 3.1}$$

que para fluidos incompressíveis pode ser reescrita como:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0, \quad \text{EQ. 3.2}$$

Equação diferencial da quantidade de movimento linear:

$$\frac{d\vec{F}}{dV} = \rho \frac{d\vec{V}}{dt}. \quad \text{EQ. 3.3}$$

Decompondo-se a força nos três tipos que atuam em fluidos, que são: força de campo (gravidade), forças de pressão e viscosas têm-se:

$$\rho g_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} = \rho \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right). \quad \text{EQ. 3.4}$$

A equação acima é insuficiente, pois apresenta como incógnitas tanto as tensões viscosas τ_{ij} , representadas na FIG. 3.1, quanto as componentes da velocidade u_i , não sendo possível resolvê-la isoladamente. No caso de fluidos newtonianos, para os quais a viscosidade dinâmica é independente da taxa de cisalhamento, pode-se utilizar as seguintes relações para as tensões viscosas (FOX, 2004):

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right). \quad \text{EQ. 3.5}$$

Substituindo-se esta relação na EQ. 3.4 é obtida a equação

$$\rho g_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] = \rho \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right), \quad \text{EQ. 3.6}$$

conhecida como equação de *Navier-Stokes*, que se resume numa relação entre forças e velocidades ocorrendo num escoamento. Como as velocidades, normalmente, são as principais incógnitas no estudo de escoamento num fluido, esta equação se torna de fundamental importância na mecânica dos fluidos.

3.3. MODELOS DE ESCOAMENTO TURBULENTO

O escoamento que ocorre em transporte encapsulado é classificado como turbulento, assim como quase todos os problemas práticos de engenharia envolvendo dinâmica de fluidos. Escoamentos turbulentos são caracterizados, principalmente, por um campo de velocidades desordenado e instável, tendo como oposto os escoamentos laminares (FIG. 3.2).

Uma maneira prática de se prever se um escoamento será laminar ou turbulento, é a análise do Número de Reynolds, definido por

$$Re = \frac{\rho VL}{\mu}, \quad \text{EQ. 3.7}$$

um adimensional que se resume na relação entre forças inerciais e forças viscosas. Para valores de Re elevados, acima de 10.000, o escoamento será tipicamente turbulento (WHITE, 2006).

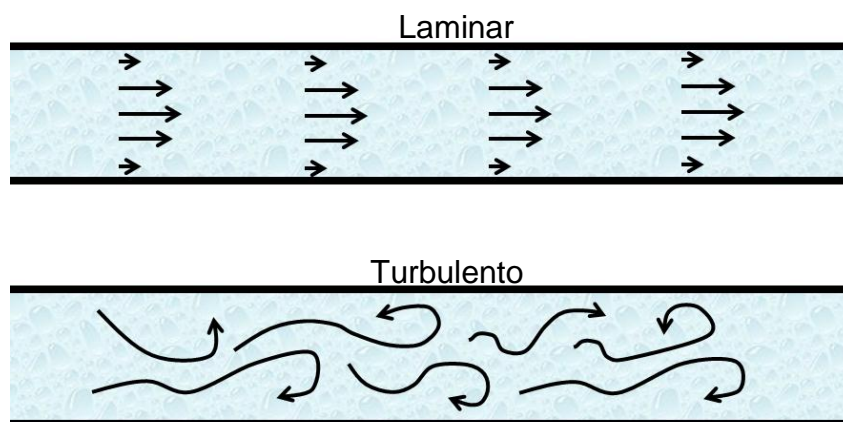


FIG. 3.2 Escoamento Laminar X Turbulento

Além da desordenação, na turbulência ocorre uma grande ocorrência de vórtices flutuantes e conseqüentemente, movimentos rotacionais transientes. Isto gera a necessidade de se considerar, mesmo em análises bidimensionais, os efeitos tridimensionais desta vorticidade. Também ocorre uma intensa troca de massa, quantidade de movimento e energia, ou seja, um efeito difusivo e advectivo dessas grandezas.

O gradiente de velocidade elevado causa a incidência de elevadas tensões viscosas, conforme pode ser verificado na EQ. 3.5. Isto acarreta numa das principais consequências práticas da turbulência, a dissipação de energia, o que pode ser constatado pela equação do trabalho realizado pelas tensões viscosas:

$$\dot{W}_{\text{visc}} = -\int_{\text{SC}} \vec{\tau} \cdot \vec{V} dA, \quad \text{EQ. 3.8}$$

Esta perda se dá na forma de calor. Como tal calor, pelo princípio da entropia, não será reaproveitado no escoamento, esta energia é “perdida”, efeito muitas vezes desejado, conforme será comentado no próximo capítulo.

Devido a todos os fatores comentados anteriormente, a solução exata de escoamentos turbulentos pela equação de *Navier-Stokes* (EQ. 3.6) é inviável para problemas práticos. Tal impasse torna de vital importância os conhecimentos adquiridos nos diversos experimentos realizados com fluidos, para o prosseguimento do desenvolvimento de modelos matemáticos capazes de reproduzir, com confiabilidade, o comportamento dos fluidos em escoamentos turbulentos.

De acordo com observações experimentais, os vórtices se apresentam num espectro contínuo de dimensão, cuja faixa é diretamente proporcional ao Número de Reynolds. O limite superior deste espectro (maior dimensão dos vórtices), obviamente, são as distâncias entre os contornos do escoamento, pois o vórtice, para existir, deve estar completamente compreendido pela região que o fluido ocupa. A frequência de flutuação dos maiores vórtices é relativamente baixa, opostamente aos menores vórtices, que apresentam maiores frequências de flutuação e maior dissipação de energia. Os menores vórtices ainda são muito maiores que as moléculas do fluido, o que mantém a validade da hipótese do contínuo. Num processo chamado “cascata de energia”, esta é transmitida dos vórtices maiores aos menores, aumentando sua intensidade de dissipação. Além disso, vórtices menores tendem a apresentar características menos anisotrópicas (dependentes da direção em que são analisados) e, conseqüentemente, para Re elevados, a dissipação de energia é considerada isotrópica, se tornando uma hipótese simplificadora. São os maiores vórtices que, normalmente, têm maior contribuição para parcela de transporte de massa, quantidade de movimento (linear

e angular) e energia. Portanto, estes são os mais importantes para consideração no modelo matemático e suas dimensões são chamadas de “comprimento característico” de turbulência (WROBEL, 1989).

A consideração destes padrões possibilita o desenvolvimento de modelos simplificados e, conseqüentemente, aproximados de escoamento turbulento, tornando viável sua solução numérica. O grande desenvolvimento de capacidade computacional ocorrido nos últimos 15 anos, aliado às pesquisas teóricas e/ou experimentais disponíveis até então, vem tornando a modelagem computacional da dinâmica de fluidos, ou CFD (*Computational Fluid Dynamics*), uma vertente de crescente aplicação no meio acadêmico e comercial, estimulando o desenvolvimento de diversos modelos de turbulência. Os modelos adotados para as análises realizadas neste trabalho serão apresentados na seção a seguir. São diversos os softwares de CFD disponíveis que adotam os métodos mencionados, no entanto, para este trabalho foi utilizado o software Ansys CFX.

3.3.1. EQUAÇÕES MÉDIAS DE REYNOLDS

Como consequência das características do escoamento turbulento, observadas experimentalmente, estes tendem a apresentar flutuações em suas grandezas, em torno de um valor médio. Muitas vezes, não se têm interesse em conhecer estas flutuações, apenas seus efeitos, que se traduzem em tensões viscosas turbulentas. Portanto, uma abordagem amplamente utilizada são os métodos que consideram os valores médios das grandezas e, com um devido tratamento estatístico, os efeitos de suas flutuações.

Na FIG. 3.3 são apresentados os dados da medição de pressão num escoamento no interior de dutos flexíveis (BERTRAM, 2004). A linha pontilhada indica o valor médio observado $\bar{\phi}$ desta grandeza. Sendo assim, qualquer ponto do gráfico de valor ϕ pode ser definido pela sua média somada a uma variação instantânea ϕ' . Ou seja:

$$\phi = \bar{\phi} + \phi', \quad \text{EQ. 3.9}$$

então o valor médio pode ser obtido por

$$\bar{\phi} = \frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} \phi dt, \quad \text{EQ. 3.10}$$

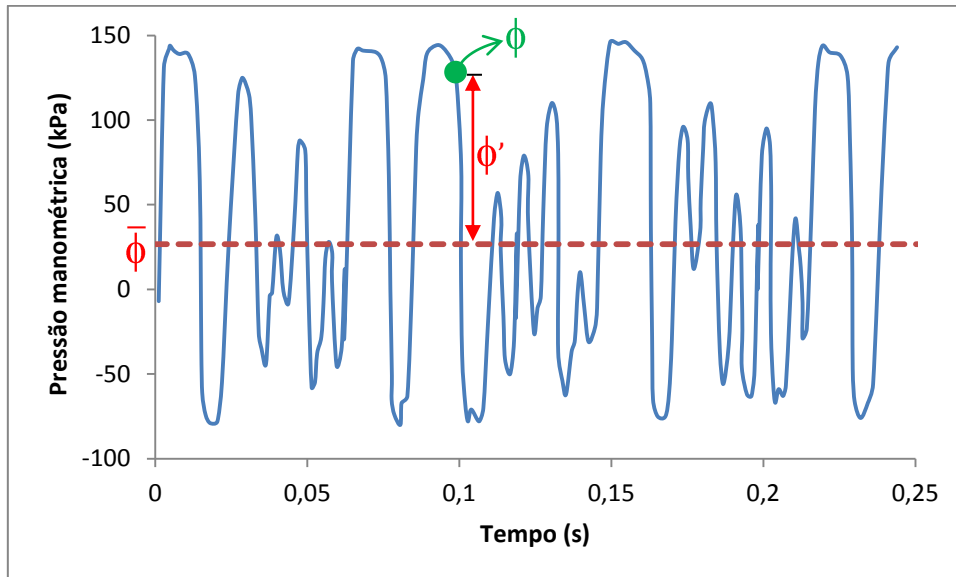


FIG. 3.3 Flutuação da pressão num escoamento turbulento

Integrando-se a equação da continuidade (EQ. 3.2) e de *Navier-Stokes* (EQ. 3.4) de maneira análoga e como, por definição, a média das flutuações $\overline{\phi'}$ é nula, obtém-se para fluidos incompressíveis:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad \text{EQ. 3.11}$$

e

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \overline{u'_i u'_j} \right) + g_i, \quad \text{EQ. 3.12}$$

conhecidas como as equações de *Navier-Stokes* com média de *Reynolds*, ou RANS (*Reynolds Averaged Navier-Stokes*). O termo $\overline{u'_i u'_j}$ representa os efeitos das flutuações e é chamado tensor de Reynolds. Pode-se observar que há mais

incógnitas que equações neste sistema, o que faz necessário a adoção de modelos complementares que analisem o tensor de Reynolds e forneçam mais equações.

Seguindo o conceito de viscosidade turbulenta ν_T , os modelos que utilizam a equação de energia turbulenta propõem a seguinte equação para o tensor de Reynolds:

$$\tau_{ij} = \overline{u'_i u'_j} = 2\nu_T S_{ij} - \frac{2}{3} k \delta_{ij}, \quad \text{EQ. 3.13}$$

onde

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad \text{EQ. 3.14}$$

é o tensor de deformação, δ_{ij} é o delta de *Kronecker* e k é a energia cinética de turbulência. Esta última deve satisfazer a equação de transporte, pois é uma das grandezas transportadas pela turbulência e é calculada pela fórmula:

$$k = \frac{1}{2} \overline{u_i^2} = \frac{1}{2} (\overline{u_1^2} + \overline{u_2^2} + \overline{u_3^2}). \quad \text{EQ. 3.15}$$

3.3.1.1. MODELO SST K- ω

O modelo k - ω convencional considera a viscosidade turbulenta como a relação entre energia cinética turbulenta (k) e “a taxa de dissipação de energia por unidade de volume e tempo” (ω), que também deve satisfazer a equação de transporte (WILCOX, 1993). Logo:

$$\nu_T = \frac{k}{\omega}. \quad \text{EQ. 3.16}$$

Portanto, o tensor de Reynolds é dado por

$$\tau_{ij} = 2 \frac{k}{\omega} S_{ij} - \frac{2}{3} k \delta_{ij}. \quad \text{EQ. 3.17}$$

O modelo SST k- ω (*Shear Stress Transport k- ω*) leva em conta o transporte de tensão cisalhante e adota uma relação de proporcionalidade entre a tensão de cisalhamento de Reynolds numa camada limite (τ) e a energia cinética turbulenta (k), sendo:

$$\tau = -\rho \overline{u'_1 u'_2}, \quad \text{EQ. 3.18}$$

onde 1 e 2 são as direções longitudinal e transversal, respectivamente. Ou seja:

$$\tau = \rho \alpha_1 k. \quad \text{EQ. 3.19}$$

Nesta última equação, o valor da constante α_1 é 0,3. Por outro lado, nos modelos de duas equações (e.g.: k-kL e k- ϵ), a tensão cisalhante é calculada por

$$\tau = \rho \nu_T \frac{\partial u_1}{\partial x_2}. \quad \text{EQ. 3.20}$$

Para os modelos convencionais de duas equações, neste caso o k- ω , a equação anterior pode ser reescrita na forma

$$\tau = \rho \sqrt{\frac{(\text{Produção})_k}{(\text{Dissipação})_k}} \alpha_1 k. \quad \text{EQ. 3.21}$$

Porém, para evitar o cálculo superestimado resultante da EQ. 3.21, constatado experimentalmente, e satisfazer ambas EQ. 3.16 e EQ. 3.19, a viscosidade turbulenta é redefinida na forma

$$\nu_t = \frac{a_1 k}{\max\left(a_1 \omega; \frac{\partial u_1}{\partial x_2} F_2\right)}. \quad \text{EQ. 3.22}$$

Por fim, As equações do modelo SST são:

Transporte da energia cinética turbulenta:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \bar{u}_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = \tau_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \beta^* k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(v + \sigma_k v_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right]. \quad \text{EQ. 3.23}$$

Transporte da taxa de dissipação específica (dissipação por volume e por tempo):

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \bar{u}_i \frac{\partial \omega}{\partial x_i} = \alpha \frac{\omega}{k} \tau_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \beta \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(v + \sigma_\omega v_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + (1 - F_1) 2 \sigma_d \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}. \quad \text{EQ. 3.24}$$

As funções de mistura F_1 e F_2 são de fundamental importância para a eficiência e versatilidade deste método (MENTER, 1994). Sua formulação é baseada na distância à superfície mais próxima e as variáveis do escoamento.

TAB. 3.1 Constantes dos métodos k- ω e k- ϵ

| Constantes | Método | |
|-----------------|-------------|---------------|
| | k- ω | k- ϵ |
| β | 0,075 | 0,0828 |
| β^* | 0,09 | 0,09 |
| σ_k | 0,5 | 1,0 |
| σ_ω | 0,5 | 0,0856 |
| σ_d | 0,856 | 0,856 |
| α | 5/9 | 0,44 |

Adotando ϕ para denominar qualquer das constantes listadas na TAB. 3.1 para o modelo SST, ϕ_1 e ϕ_2 as mesmas constantes correspondentes aos modelos k- ω e k- ϵ , respectivamente. Então, ϕ é obtido por uma interpolação definida na equação

$$\phi = F_1 \phi_1 + (1 - F_1) \phi_2, \quad \text{EQ. 3.25}$$

onde F_1 é dado por

$$F_1 = \tanh[\theta_1^4] \quad \text{EQ. 3.26}$$

$$\theta_1 = \min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right), \frac{4\rho \sigma_{\omega 2} k}{CD_{k\omega} y^2} \right],$$

sendo y a distância até a parede e $CD_{k\omega}$ é a parte positiva do termo de difusão cruzada, calculado por

$$CD_{k\omega} = \max \left(2\rho \sigma_d \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, 10^{-10} \right), \quad \text{EQ. 3.27}$$

Para obtenção da viscosidade turbulenta é definido o fator

$$F_2 = \tanh[\theta_2^2] \quad \text{EQ. 3.28}$$

$$\theta_2 = \max \left(2 \frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right),$$

Tais funções são resultados de calibrações feitas para o modelo em questão baseadas em experimentos de escoamentos de camada limite e cisalhamento livre.

3.3.1.2. MODELO RSM

Com o intuito de se superar as limitações geradas pelo conceito de viscosidade turbulenta, este método não considera a hipótese da viscosidade turbulenta isotrópica, conforme feito pelo modelo SST $k-\omega$ e outros. Então, para complementar as equações RANS e tornar possível sua solução, são adotadas equações diretas para o transporte das tensões de Reynolds. Por isso, este é chamado de *Reynolds Stress Model* (RSM), mas também é classificado como modelo do fechamento de segunda ordem (WILCOX, 1993)

As equações de transporte das tensões de Reynolds são obtidas a partir das equações de *Navier-Stokes* e das equações médias de Reynolds, resultando em

$$\frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} (\overline{u_k u'_i u'_j}) - \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\left(\nu + \frac{2}{3} C_s \frac{k^2}{\varepsilon} \right) \frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_k} \right] = P_{ij} + \phi_{ij} + P_{ij,b} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \varepsilon, \quad \text{EQ. 3.29}$$

onde P_{ij} é a produção dada por

$$P_{ij} = -\overline{u'_i u'_k} \frac{\partial u_j}{\partial x_k} - \overline{u'_j u'_k} \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \quad \text{EQ. 3.30}$$

e $P_{ij,b}$ é a produção causada pelo empuxo:

$$P_{ij,b} = B_{ij} - C_{\text{emp}} \left(B_{ij} - \frac{1}{3} B_{kk} \delta_{ij} \right), \quad \text{EQ. 3.31}$$

sendo B_{ij} contribuição do empuxo a partir do termo pressão-deformação que é dada por

$$B_{ij} = g_i b_j + g_j b_i, \quad \text{EQ. 3.32}$$

cuja modelagem baseada na diferença de densidades pode ser complementada por

$$b_i = -\frac{v_t}{\rho \sigma_\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x_i}. \quad \text{EQ. 3.33}$$

Nas equações do RSM, assim como em outros modelos de turbulência, também há a dissipação de turbulência, portanto é necessária a inclusão da equação ε , correspondente à referida grandeza, que, neste caso, é representada por

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} (\overline{u_k \varepsilon}) = \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P_k + C_{\varepsilon 1} P_{\varepsilon b} - C_{\varepsilon 2} \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\left(\nu + \frac{v_t}{\sigma_{\varepsilon RS}} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_k} \right]. \quad \text{EQ. 3.34}$$

A correlação pressão-deformação é dividida em dois termos:

$$\phi_{ij} = \phi_{ij,1} + \phi_{ij,2}, \quad \text{EQ. 3.35}$$

onde $\phi_{ij,1}$ considera a influência da flutuação da velocidade e $\phi_{ij,2}$ diz respeito ao efeito do gradiente da velocidade média. Para esta correlação foi adotado o modelo

proposto por SPEZIALE *et al.* (1990), denominado SSG (Speziale, Sarkar e Gatski), que define seus termos pelas equações:

$$\phi_{ij,1} = -\varepsilon \left[C_{s1} a_{ij} + C_{s2} \left(a_{ik} a_{kj} - \frac{1}{3} a_{mn} a_{mn} \delta_{ij} \right) \right] \quad \text{EQ. 3.36}$$

e

$$\begin{aligned} \phi_{ij,2} = & -\frac{1}{2} C_{r1} P_{ii} a_{ij} + C_{r2} k S_{ij} - C_{r3} k S_{ij} \sqrt{a_{mn} a_{mn}} \\ & + C_{r4} k \left(a_{ik} S_{ijk} + a_{jk} S_{ikj} - \frac{2}{3} a_{kl} S_{kl} \delta_{ij} \right) + C_{r5} k (a_{ik} \Omega_{ijk} + a_{jk} \Omega_{jik}) \end{aligned} \quad \begin{array}{l} \text{EQ.} \\ 3.37 \end{array}$$

onde

$$a_{ij} = \frac{\overline{u_i' u_j'}}{k} - \frac{2}{3} \delta_{ij}, \quad \text{EQ. 3.38}$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad \text{EQ. 3.39}$$

e

$$\Omega_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad \text{EQ. 3.40}$$

é o tensor de rotação médio.

Os coeficientes das equações apresentadas para o modelo RSM são listados na TAB. 3.2.

TAB. 3.2 Coeficientes do modelo RSM

| Constante | Valor | Constante | Valor |
|---------------------------|-------|-----------|-------|
| $C_{\mu RS}$ | 0,1 | C_{S1} | 1,7 |
| $\sigma_{\varepsilon RS}$ | 1,36 | C_{S2} | -1,05 |
| C_S | 0,22 | C_{r1} | 0,9 |
| C_ε | 0,18 | C_{r2} | 0,8 |
| $C_{\varepsilon 1}$ | 1,45 | C_{r3} | 0,65 |
| $C_{\varepsilon 2}$ | 1,83 | C_{r4} | 0,625 |
| | | C_{r5} | 0,2 |

4. MÉTODO NUMÉRICO

4.1. MÉTODO DOS VOLUMES FINITOS (MVF)

Conforme mostrado no capítulo anterior, a equação de *Navier-Stokes* representa o comportamento dos fluidos newtonianos, porém, para a viabilidade de sua solução são adotados modelos de turbulência. No modelo de turbulência adotado neste trabalho, a modelagem matemática é definida, basicamente, pelas **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, EQ. 3.12, complementadas pelo modelo de turbulência adotado.

Este sistema de equações não possui solução analítica para a maioria dos casos práticos, inclusive para o escoamento em transporte encapsulado. Então, a utilização de métodos numéricos se faz necessária a fim de se obter uma solução com aproximação aceitável. Além disso, as equações deste sistema apresentam uma não linearidade muito forte, evidenciada pelos diversos parâmetros dependentes das próprias variáveis do escoamento, justamente as quais se deseja calcular. Portanto, tal qual a modelagem matemática, o modelo numérico necessário para escoamentos turbulentos não é trivial e deve ser bem desenvolvido para que tenda a apresentar boa convergência e minimize os erros de difusão numérica.

Pode-se encontrar na literatura a utilização de diversos métodos para a solução numérica do fenômeno em questão, entre eles: Método dos Elementos Finitos (MEF) e o Método das Diferenças Finitas (MDF). No entanto, o método numérico mais eficiente para problemas de CFD (*Computational Fluid Dynamics*) em geral é o Método dos Volumes Finitos (MVF). Isto se dá, principalmente, pela forma como ele é desenvolvido, que impõe o princípio de conservação para cada uma das grandezas.

O primeiro passo consiste em se considerar a equação de transporte para uma variável qualquer ϕ :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \phi) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) + S_\phi, \quad \text{EQ. 4.1}$$

que inclui um termo advectivo (segundo termo), um termo difusivo com coeficiente Γ_ϕ e uma fonte S_ϕ . Então, o domínio de interesse deve ser discretizado em elementos e as variáveis são armazenadas nos nós dessa malha. O volume de controle é definido pelas medianas, ou seja, pelas linhas que ligam os centros de cada elemento adjacente.

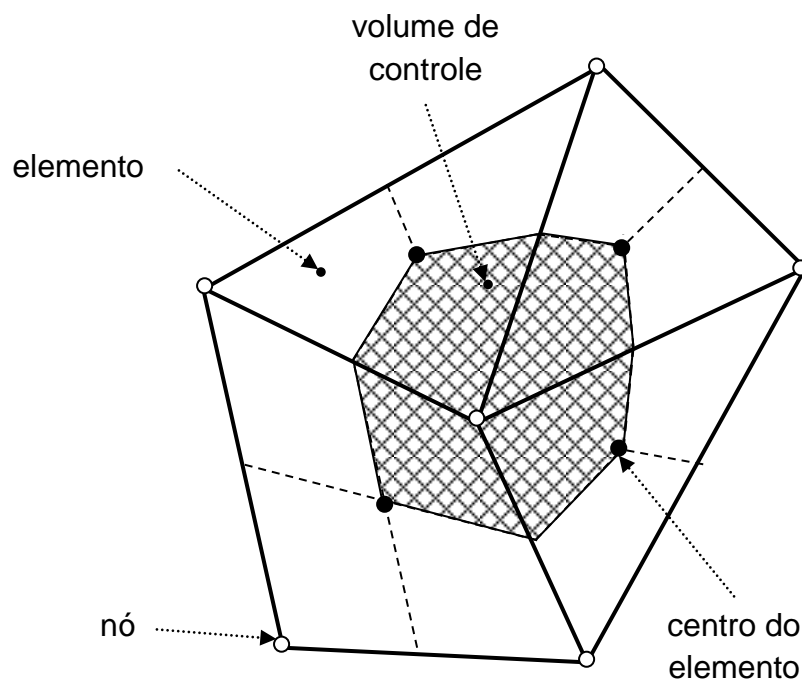


FIG. 4.1 Volume de controle

A EQ. 4.1 pode ser integrada ao longo de um volume de controle \forall qualquer, o que resulta em

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\forall} \rho \phi d\forall + \int_A \rho u_j \phi n_j dA = \int_A \Gamma_{\phi} \left(\frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) n_j dA + \int_{\forall} S_{\phi} d\forall, \quad \text{EQ. 4.2}$$

onde A é a superfície de integração e n_j as componentes do vetor normal à superfície de entrada ou saída. As integrais de volume representam termos fonte ou acumuladores e as integrais de superfície representam fluxos. O detalhamento do elemento da malha pode ser observado na FIG. 4.1.

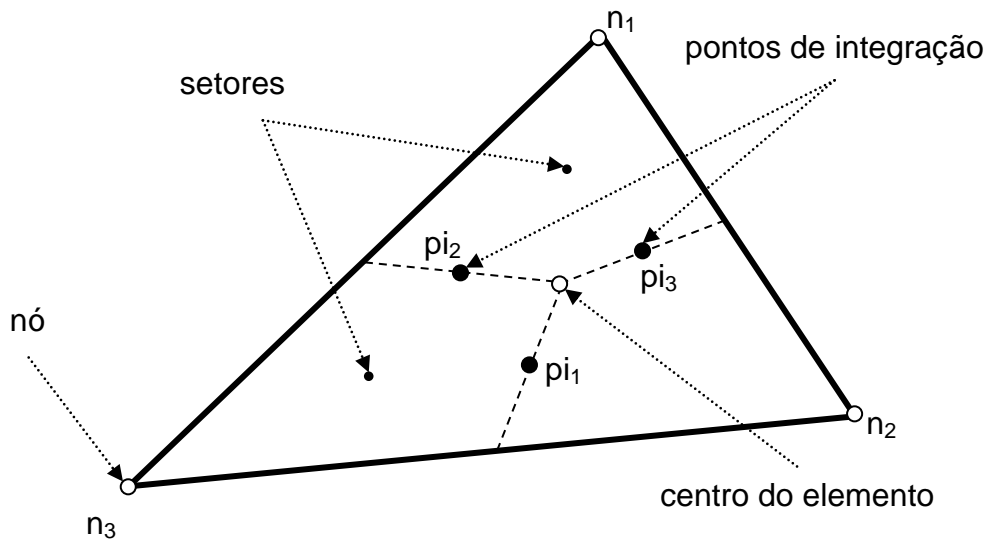


FIG. 4.2 Elemento da malha

Para simplificação do cálculo, as integrais de superfície são discretizadas em pontos de integração (pi) e considera-se um valor médio para o termo fonte, ao longo do interior de cada volume. Então, a EQ. 4.2 é simplificada para

$$\left(\frac{\rho \phi - \rho^0 \phi^0}{\Delta t} \right) \forall + \sum_{pi} \dot{m}_{pi} \phi_i = \sum_{pi} \left(\Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \Delta n_j \right)_{pi} + \bar{S}_{\phi} \forall, \quad \text{EQ. 4.3}$$

onde

$$\dot{m} = (\rho u_j \Delta n_j)_{pi}, \quad \text{EQ. 4.4}$$

é a vazão mássica atravessando a área que o ponto de integração pi representa, Δt é o passo temporal e Δn_j é o vetor de superfície normal discreto. O expoente 0 indica

o valor referente ao passo de tempo anterior. Neste caso, o esquema de primeira ordem regressivo foi utilizado para a marcha no tempo.

Observa-se que as integrais de superfície, definidas pelos pontos de integração terão mesmo valor e sinais contrários para volumes de controle adjacentes, garantindo assim que as equações resultantes serão localmente conservativas.

4.2. FUNÇÕES DE FORMA

Embora os valores das variáveis sejam armazenados nos nós da malha, é necessário se obter uma aproximação para seus valores no interior dos elementos. Isto pode ser feito pelas funções de forma dos elementos finitos. Desta forma, este valor é calculado pela interpolação definida por:

$$\phi = \sum_{i=1}^{N_{\text{nos}}} N_i \phi_i, \quad \text{EQ. 4.5}$$

onde ϕ_i é o valor da variável ϕ no nó i e N_i é a função de forma que, por definição, obedece às propriedades

$$\sum_{i=1}^{N_{\text{nos}}} N_i = 1 \quad \text{EQ. 4.6}$$

e

$$\begin{cases} N_i(x_j, y_j, z_j) = 1; & \text{se } i \neq j \\ N_i(x_j, y_j, z_j) = 0; & \text{se } i = j \end{cases} \quad \text{EQ. 4.7}$$

As funções de forma utilizadas são:

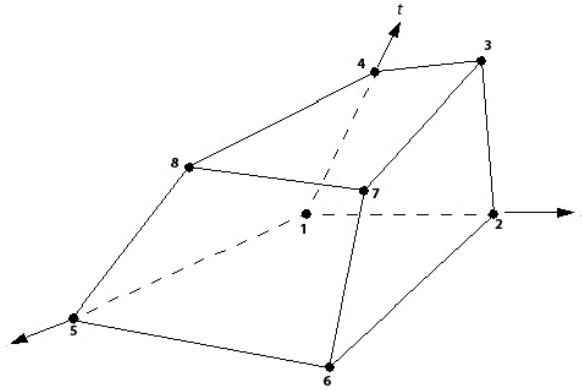


FIG. 4.3 Elemento hexaédrico

$$\left\{ \begin{array}{l}
 N_1(s,t,u) = (1-s)(1-t)(1-u) \\
 N_2(s,t,u) = s(1-t)(1-u) \\
 N_3(s,t,u) = st(1-u) \\
 N_4(s,t,u) = (1-s)t(1-u) \\
 N_5(s,t,u) = (1-s)(1-t)u \\
 N_6(s,t,u) = s(1-t)u \\
 N_7(s,t,u) = stu \\
 N_8(s,t,u) = (1-s)tu
 \end{array} \right. , \quad \text{EQ. 4.8}$$

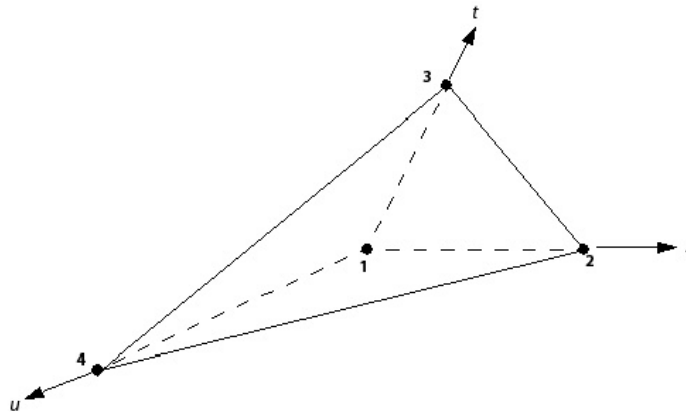


FIG. 4.4 Elemento tetraédrico

$$\begin{cases} N_1(s,t,u) = 1-s-t-u \\ N_2(s,t,u) = s \\ N_3(s,t,u) = t \\ N_4(s,t,u) = u \end{cases}, \quad \text{EQ. 4.9}$$

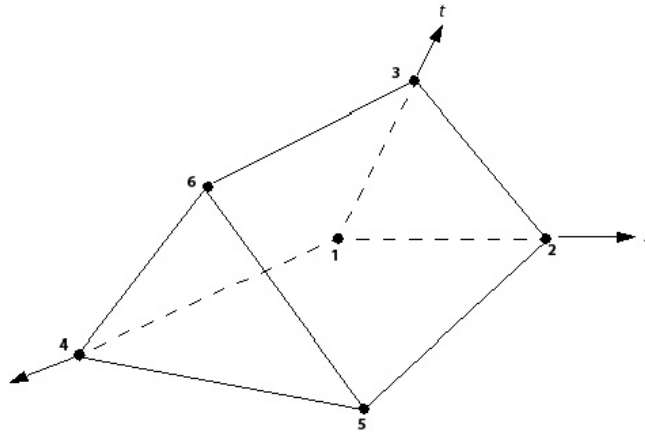


FIG. 4.5 Elemento prismático

$$\begin{cases} N_1(s,t,u) = (1-s-t)(1-u) \\ N_2(s,t,u) = s(1-u) \\ N_3(s,t,u) = t(1-u) \\ N_4(s,t,u) = (1-s-t)u \\ N_5(s,t,u) = su \\ N_6(s,t,u) = tu \end{cases}, \quad \text{EQ. 4.10}$$

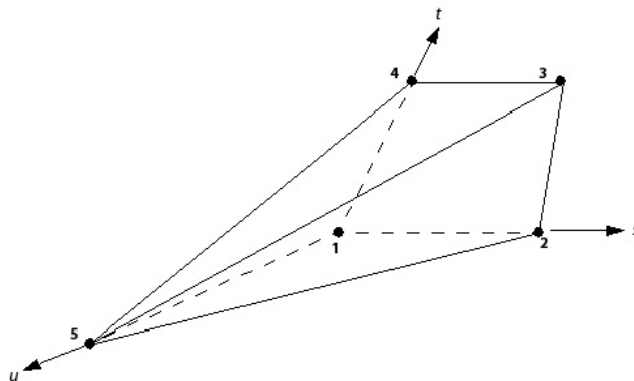


FIG. 4.6 Elemento piramidal

$$\begin{cases} N_1(s,t,u) = (1-s)(1-t)(1-u) \\ N_2(s,t,u) = s(1-t)(1-u) \\ N_3(s,t,u) = st(1-u) \\ N_4(s,t,u) = (1-s)t(1-u) \\ N_5(s,t,u) = u \end{cases} \quad \text{EQ. 4.11}$$

4.3. ESQUEMA ADVECTIVO

Para o cálculo do termo advectivo, diferentes esquemas podem ser adotados. Baseando-se em observações experimentais de que as grandezas transportadas são convectadas no sentido do escoamento, em cada ponto de integração de uma determinada célula, o valor da grandeza ϕ_{pi} pode ser definido pelo seu valor referente à próxima célula, ϕ_{up} , localizada à montante. Segundo este princípio, é utilizada a equação

$$\phi_{pi} = \phi_{up} + \beta \nabla \phi \cdot \Delta \vec{r} \quad \text{EQ. 4.12}$$

Se for adotado $\beta = 0$ a equação anterior se reduzirá à

$$\phi_{pi} = \phi_{up} \quad \text{EQ. 4.13}$$

denominada “*Upwind* de Primeira Ordem”. Quando adotado $\beta = 1$ e estabelecendo $\nabla \phi$ como a média dos gradientes nodais vizinhos, há uma redução de erros, em relação à EQ. 4.13, e o esquema é chamado central de segunda ordem.

O gradiente é calculado pela expressão oriunda do teorema da divergência de Gauss, podendo ser expresso por

$$\nabla \phi = \frac{1}{V} \sum_{pi} (\phi \Delta \vec{n})_{pi} \quad \text{EQ. 4.14}$$

onde $\Delta \vec{n}$ é o vetor de superfície, direcionado externamente à célula, no ponto de integração considerado.

4.4. ACOPLAMENTO PRESSÃO-VELOCIDADE

Como o método se baseia na solução das equações, localmente, em cada célula, há uma tendência de haver um desalinhamento do campo de pressões entre as células. Para evitar este efeito, é aplicada a equação do *momentum* para a advecção em cada ponto de integração das faces, resultando na seguinte equação de correção para suas velocidades:

$$u_{i,pi} = \bar{u}_{i,pi} + f_{pi} \left(\left. \frac{\partial p}{\partial x_i} \right|_{pi} - \left. \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} \right|_{pi} \right) - \frac{\rho}{\Delta t} f_{pi} (u_{i,pi}^0 - \bar{u}_{i,pi}^0), \quad \text{EQ. 4.15}$$

onde o índice 0 denota os valores correspondentes ao passo de tempo anterior e

$$f_{pi} = \frac{\nabla_{pi}}{\alpha - \frac{\rho \nabla_{pi}}{\Delta t}}, \quad \text{EQ. 4.16}$$

sendo α a aproximação para o coeficiente central da equação da quantidade de movimento.

Pode-se observar da EQ. 4.15 que ocorre um acoplamento entre as velocidades e pressões calculadas. Além disso, quando esta equação é substituída na equação da continuidade, se tornará uma equação cujos termos da derivada terão precisão de terceira ordem.

4.5. SISTEMA DE EQUAÇÕES LINEARES

Um valor inicial estimado para as incógnitas é assumido para que se possa linearizar os parâmetros das equações não lineares. Dessa forma, após aplicar-se a EQ. 4.3 em todos os elementos da malha e para todas as grandezas envolvidas, tem-se um sistema de equações lineares conservativas, que pode ser escrito por:

$$\sum_{vz_i} a_i^{vz} \phi_i^{vz} = b_i , \quad \text{EQ. 4.17}$$

Onde ϕ é a incógnita da grandeza, b o termo independente, a os coeficientes, i é o número do volume de controle ou nó em questão e vz se refere aos seus vizinhos.

Então, o sistema global

$$[A][\phi] = [b] \quad \text{EQ. 4.18}$$

pode ser resolvido iterativamente começando por uma solução aproximada, ϕ^n , corrigida a cada iteração por

$$\phi^{n+1} = \phi^n + \phi' , \quad \text{EQ. 4.19}$$

Onde ϕ' é solução de

$$[A][\phi'] = [r]^n , \quad \text{EQ. 4.20}$$

cujo o seu resíduo r^n é calculado por

$$[r]^n = [b] - [A][\phi]^n , \quad \text{EQ. 4.21}$$

repetitivamente, até que se alcance a precisão desejada.

4.6. INTERAÇÃO FLUIDO-ESTRUTURA

A interação entre um domínio considerado fluido e outro considerado sólido ocorre em diversas áreas da ciência. Porém, somente nos últimos anos, os métodos numéricos e recursos computacionais vêm se tornando capazes de tornar possível a implementação de modelos computacionais que considerem os efeitos dessa interação para ambos os domínios.

Devido à diferença de comportamento entre fluidos e sólidos, também são diferentes as abordagens adotadas para cada um e as grandezas físicas calculadas.

Para os fluidos, normalmente, é considerada a abordagem Euleriana, quando as equações adotadas são referenciadas ao espaço e contabilizam a massa que o atravessa. No caso dos sólidos, por outro lado, a abordagem adequada é a Lagrangiana, onde o referencial adotado é a massa e, conseqüentemente, cada ponto do domínio é acompanhado ao longo de seu deslocamento.

Quanto às variáveis de interesse, num domínio fluido em regime dinâmico, são calculadas as velocidades e pressões, enquanto que, num sólido, as incógnitas do problema serão os deslocamentos e forças/tensões.

Isso torna o desenvolvimento de equações que englobem ambos, simultaneamente, se torne inviável. Uma alternativa consiste em se modelar os domínios, separadamente, e criar uma interface entre as malhas geradas para cada um, por onde são transmitidas as tensões e deslocamentos.

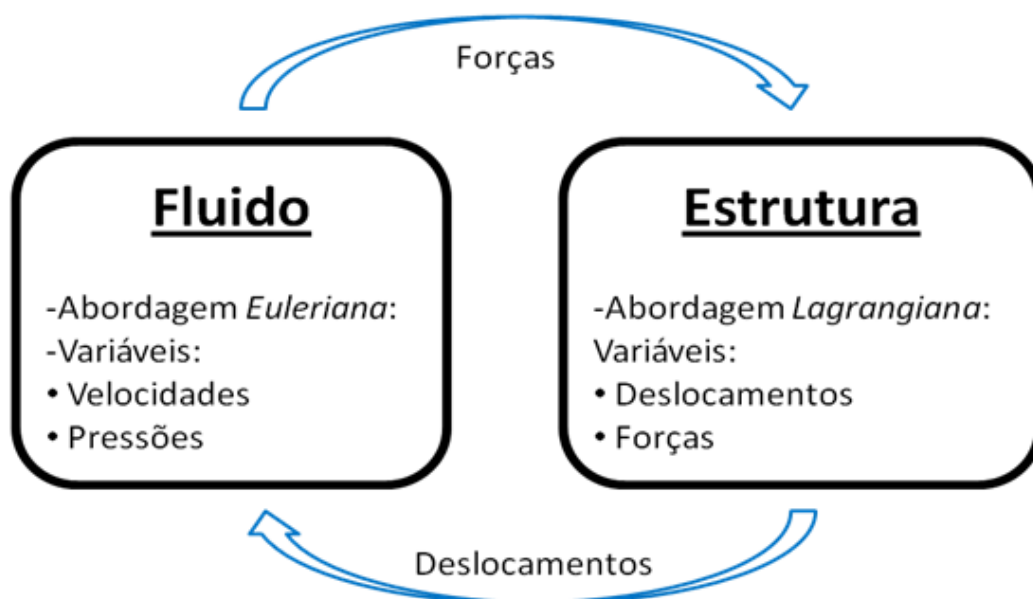


FIG. 4.7 Interação fluido-estrutura

As pressões e tensões viscosas resultantes do domínio fluido pelo método dos volumes finitos (MVF) são integradas ao longo da superfície de interface e transmitidas como forças para a estrutura. Então, o problema é resolvido estruturalmente, calculando-se deslocamentos pelo método dos elementos finitos

(MEF) que são transmitidos de volta para malha do domínio fluido. Este processo é repetido até que se seja atingida a precisão desejada.

O deslocamento que ocorre na interface fluido-estrutura é, naturalmente, propagado na malha estrutural, pois faz parte das considerações feitas pela abordagem Lagrangiana. No domínio fluido, por outro lado, este deslocamento deve ser imposto à sua malha, neste caso, isto é feito pela equação da difusão

$$\nabla(\Gamma_{\text{desl}} \nabla \delta) = 0, \quad \text{EQ. 4.22}$$

na qual δ é o deslocamento e Γ_{desl} é a rigidez da malha, que deve ser definida em todo domínio. Quanto maior o valor da rigidez de uma determinada região, menor será sua deformação e vice-versa.

Devido à deformação causada na malha, a EQ. 4.2 deverá ser modificada para que considere a velocidade w do volume de controle, assim como a alteração de sua geometria, ficando na forma

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{V(t)} \rho \phi dV + \int_A \rho (u_j - w_j) \phi n_j dA = \int_A \Gamma_\phi \left(\frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) n_j dA + \int_{V(t)} S_\phi dV, \quad \text{EQ. 4.23}$$

onde pode ser observado a dependência do volume de controle em relação ao tempo, pois o mesmo se deforma com a malha, além da velocidade da superfície de controle.

5. MODELAGEM COMPUTACIONAL

5.1. PROBLEMA FÍSICO

A modelagem computacional realizada neste trabalho tem por objetivo obter as velocidades e pressões desenvolvidas no interior do tubo, dada a vazão, o diâmetro do duto e a geometria da cápsula.

Tais informações, assim como todas as outras necessárias para a elaboração de um modelo completo, referem-se ao experimento realizado por RICHARDS (1992).

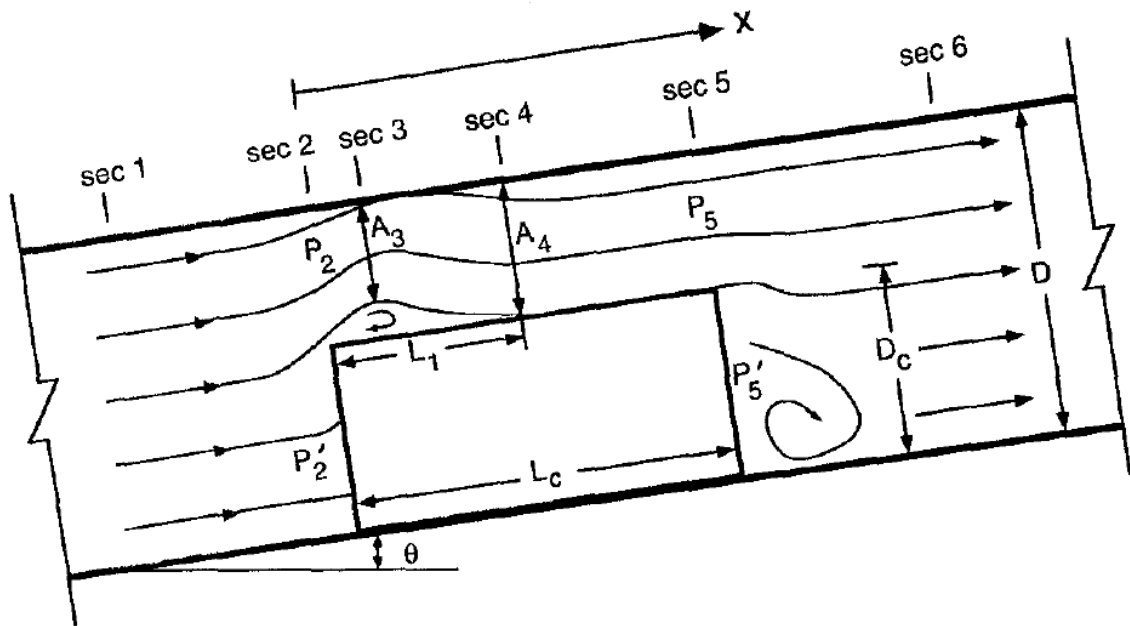


FIG. 5.1 Representação esquemática do escoamento (LIU e RICHARDS, 1994).

Neste experimento, foi medida a velocidade incipiente, ou seja, a velocidade a partir da qual a cápsula se movimenta no interior do duto, para sete casos diferentes, onde foram variadas as dimensões da cápsula, e seu material, o que influencia, diretamente, no seu atrito com a parede interna do duto.

Inicialmente, a cápsula encontra-se em repouso no fundo do duto e a vazão é nula. Esta é aumentada, gradativamente, até que se observe seu movimento. Neste problema físico, tem-se o fenômeno do escoamento, que se analisa do ponto de vista fluidodinâmico. Além disso, há o equilíbrio de forças que atuam na cápsula e devem ser analisadas do ponto de vista estrutural, entre elas: peso, normal, atrito, arrasto e empuxo.

Portanto, são parâmetros do problema: o diâmetro interno do duto (D), o diâmetro e comprimento da cápsula (D_c e L_c), a massa específica do seu material constituinte (ρ_c), o coeficiente de atrito (η) e as propriedades da água.

As forças atuantes na cápsula, além do peso e contato com o fundo do tubo, podem ser divididas em:

- Forças de arrasto (F_{dd}) : somatório das forças que o fluido exerce na cápsula com direção e sentido do escoamento. Elas se devem, basicamente, a força cisalhante na área lateral da cápsula e a resultante da aplicação da pressão do fluido na extremidade à montante e à jusante da cápsula;

- Forças de empuxo (E) : é a resultante das forças de pressão estática atuantes na superfície lateral da cápsula, contidas no plano vertical perpendicular ao eixo do duto. Esta força pode ser obtida pela equação

$$E = \rho \nabla g . \quad \text{EQ. 5.1}$$

- Força de levantamento (F_L) : Esta força surge devido à diferença de pressão entre a parte superior e inferior da cápsula, causada pela dinâmica do fluido. Ou seja, em regime estático esta força é nula.

A única força que age contra o movimento da cápsula é a força de atrito. Esta pode ser calculada por

$$F_{at} = \eta N, \quad \text{EQ. 5.2}$$

onde η é o coeficiente de atrito e N a força normal que se deve à diferença entre o peso da cápsula e a força de empuxo:

$$N = P - E - F_L. \quad \text{EQ. 5.3}$$

Conseqüentemente, o movimento ocorre quando a força de arrasto é superior à força de atrito estático:

$$F_d > F_{at} \rightarrow F_d > \eta[(\rho_c - \rho_a)\forall g - F_L], \quad \text{EQ. 5.4}$$

Onde ρ_c e ρ_a são as massas específicas da cápsula e da água, respectivamente, e \forall é o volume da cápsula. As forças de arrasto e levantamento (F_d e F_L) são calculadas através da integral das pressões e tensões viscosas ao longo da superfície da cápsula.

Vale ressaltar que a EQ. 5.2 constitui-se numa simplificação, que assume um comportamento linear do atrito em função da força normal, independente da área de contato, o que nem sempre é uma boa aproximação.

Experimentalmente, observa-se a ocorrência de vórtices em duas regiões principais, conforme FIG. 5.1. A primeira está localizada logo acima da extremidade da cápsula à montante. Já a segunda, com dimensão característica muito superior, é formada pela brusca mudança na seção de escoamento que ocorre com o fluido ao sair da região da cápsula. No restante do escoamento, em geral, não há grande ocorrência de turbulência.

Esses vórtices causam efeito direto no comportamento da pressão e, conseqüentemente, devem ser corretamente representados para que o cálculo posterior das forças resultantes tenha boa precisão.

5.2. MODELO COMPUTACIONAL

A ferramenta computacional utilizada para aplicação do método numérico apresentado no Capítulo 4 foi o software ANSYS CFX v14. Trata-se de um software de reconhecida confiabilidade e eficiência, tanto no meio acadêmico quanto comercial, para modelagem de CFD, que acumula mais de vinte anos de desenvolvimento. Para modelagem estrutural, que possui menor ênfase neste trabalho, foi utilizado o software ANSYS MECHANICAL v14.

O modelo desenvolvido deve ser capaz de representar todos os aspectos apresentados na seção anterior. Para tal, é necessário se considerar tanto o domínio fluido, quanto o domínio estrutural. Ou seja, trata-se de uma modelagem que considere a interação fluido-estrutura.

No entanto, o fenômeno de maior complexidade e dificuldade de resolução, neste caso, é o escoamento turbulento. Portanto, para o domínio estrutural (cápsula), não serão consideradas as tensões internas, apenas a força de contato, dividida em normal e atrito, entre a cápsula e a parede interna do tubo, além dos movimentos de um corpo considerado rígido, que são representados pelas equações:

$$\sum \vec{F} = m\vec{a} \quad \text{EQ. 5.5}$$

e

$$\sum \vec{M}_0 = I_i \vec{\alpha}_i, \quad \text{EQ. 5.6}$$

sendo o lado esquerdo da EQ. 5.5 e EQ. 5.6 a força e o momento resultante, respectivamente. Do outro lado, tem-se a massa m , aceleração linear a , momento de inércia I_i e aceleração angular α_i em relação ao eixo i .

Por simplificação, é considerada uma simetria em relação ao plano vertical que contém o eixo do duto. Portanto, apenas três graus de liberdade precisam ser

calculados para o movimento do corpo rígido: deslocamento vertical (u_z), deslocamento horizontal na direção do eixo (u_x) e rotação horizontal transversal ao eixo (r_y). O sistema referencial adotado pode ser visualizado na FIG. 5.2.

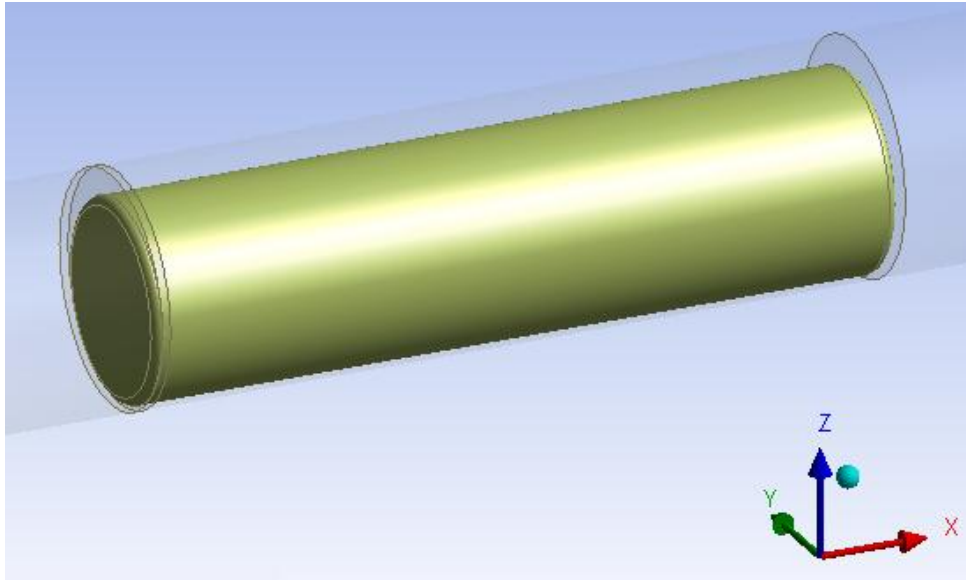


FIG. 5.2 Cápsula modelada no interior do duto e eixos cartesianos adotados

5.2.1. DISCRETIZAÇÃO ESPACIAL

A chave para um modelo que apresente estabilidade e eficiência é uma adequada discretização do domínio estudado. Conforme apresentado no Capítulo 4, essa etapa consiste em se dividir o espaço em elementos tetraédricos, hexagonais, prismáticos ou piramidais, definidos por nós que determinam, geometricamente, seus vértices.

Para se gerar uma malha que represente bem as regiões críticas e, ao mesmo tempo, seja eficiente, é conveniente se conhecer, previamente, o comportamento esperado para o escoamento, que pode ser visualizado na FIG. 5.1. Na medida do possível, procura-se manter as faces dos elementos perpendiculares à direção do fluxo, para minimizar erros de truncamento no cálculo das componentes da velocidade. Além disso, deve haver um “refinamento” (elementos de dimensões reduzidas) da malha nas regiões de maior turbulência e gradiente de

velocidade/pressão. O resultado da malha final, obedecendo a estas considerações pode ser visualizado na FIG. 5.3.

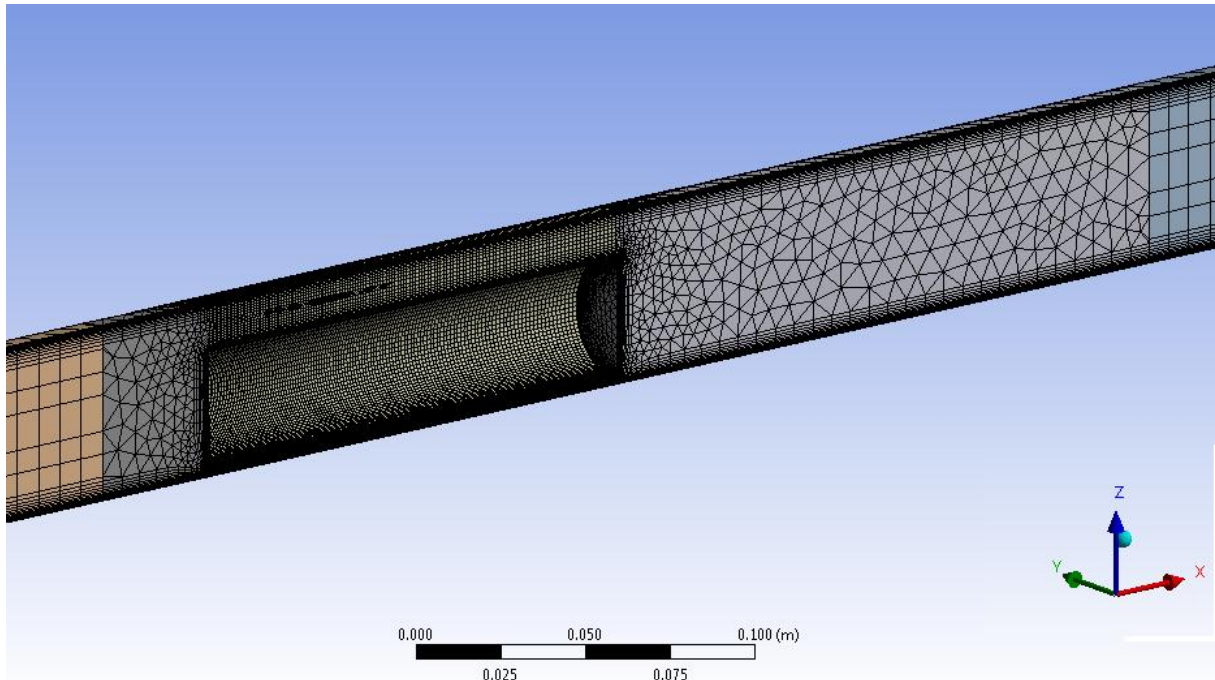


FIG. 5.3 Malha gerada (vista geral)

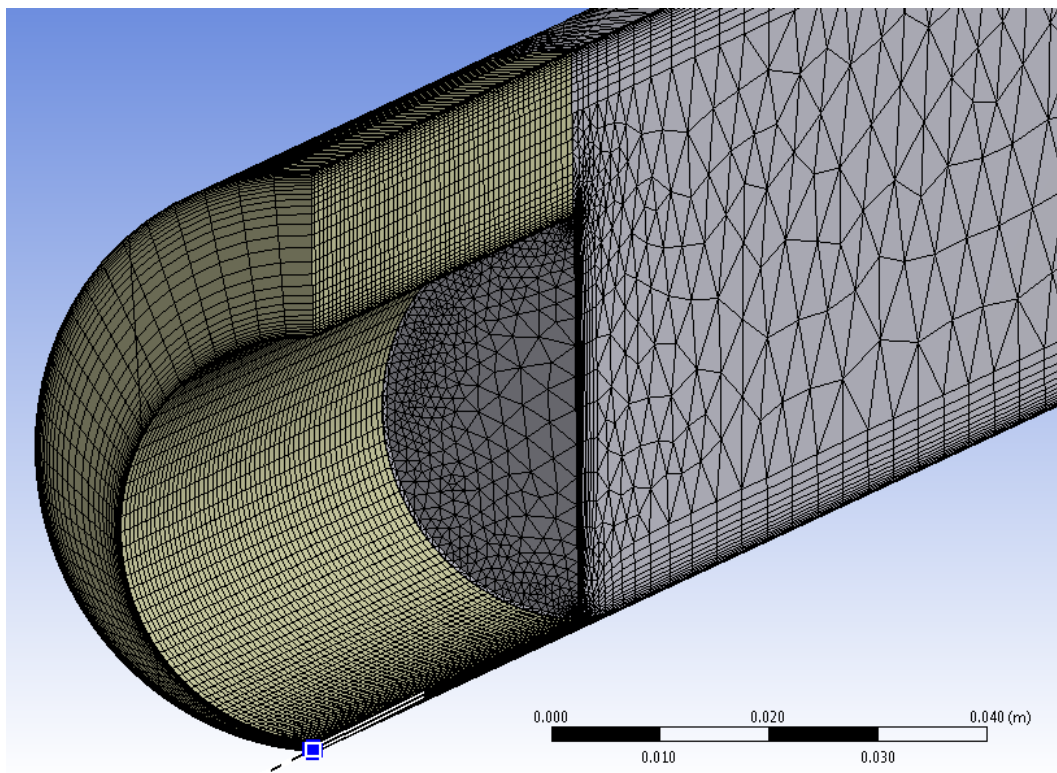


FIG. 5.4 Malha gerada (vista em corte)

Para a que o método numérico capture os efeitos da camada limite próximo à parede do tubo e da cápsula, também deve haver um refinamento nestas regiões. Esta redução da dimensão dos elementos é evidenciada pela vista em corte da FIG. 5.4.

Em maior parte, são utilizados elementos hexagonais, pois possuem boa eficiência numérica. Porém, nos locais onde o campo de velocidades não é regular, ou seja, nas regiões de maior vorticidade, foram utilizados elementos tetraédricos, pois suas faces se adequam melhor a velocidades incidentes de direções variáveis.

Por fim, as malhas adotadas para o estudo em questão tem um número de elementos variando entre 100 de 200 mil.

5.2.2. CONDIÇÕES DE CONTORNO

As condições de contorno adotadas foram as seguintes:

- **Entrada:** velocidade especificada igual à velocidade média do escoamento. 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 velocidade foi aplicada de forma variável ao longo do tempo, iniciando em $t=0$ com valor nulo e mantendo variação positiva até que se detectasse o movimento da cápsula. A turbulência de entrada adotada foi de 5%.

- **Saída:** pressão especificada igual à pressão estática, ou seja,

$$p = \rho gh = \rho g(D - z), \quad \text{EQ. 5.7}$$

onde D é o diâmetro interno do duto e z a cota onde a pressão é calculada.

- **Superfícies do tubo e cápsula:** é adotada a condição do tipo parede, onde a velocidade é nula. Foram consideradas superfícies lisas (rugosidade nula), exceto para as cápsulas de carvão, onde foi adotado uma rugosidade absoluta de 0,1 mm.

- **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.

A velocidade de entrada foi aplicada variadamente, com valor crescente ao longo do tempo, até que fosse observado o movimento da cápsula.

5.2.3. PROPRIEDADE DOS MATERIAIS

O fluido considerado é a água e os materiais utilizado como cápsulas no experimento realizado foram o acrílico e o carvão compactado (CLP). As propriedades físicas que foram adotadas como dados de entrada estão relacionadas na TAB. 5.1.

TAB. 5.1 Propriedades dos materiais modelados

| Material | Propriedade | Valor | Unidade |
|-----------------|----------------------|------------------------|-------------------|
| Água | Massa específica | 997,0 | kg/m ³ |
| | Viscosidade dinâmica | $8,899 \times 10^{-4}$ | kg/(m.s) |
| Acrílico | Densidade | 1,176 | (adimensional) |
| Carvão (CLP) | | 1,174 | |

5.3. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Devido à complexidade e dificuldade em se modelar fluidos em regime turbulento, a confiabilidade dos resultados está sujeita uma diversidade de fatores já mencionados. Entre eles: modelo de turbulência adotado, método numérico aplicado, discretização do domínio e condições de contorno.

Portanto, é pertinente se observar alguns aspectos qualitativos antes de se aceitar, numericamente, os resultados.

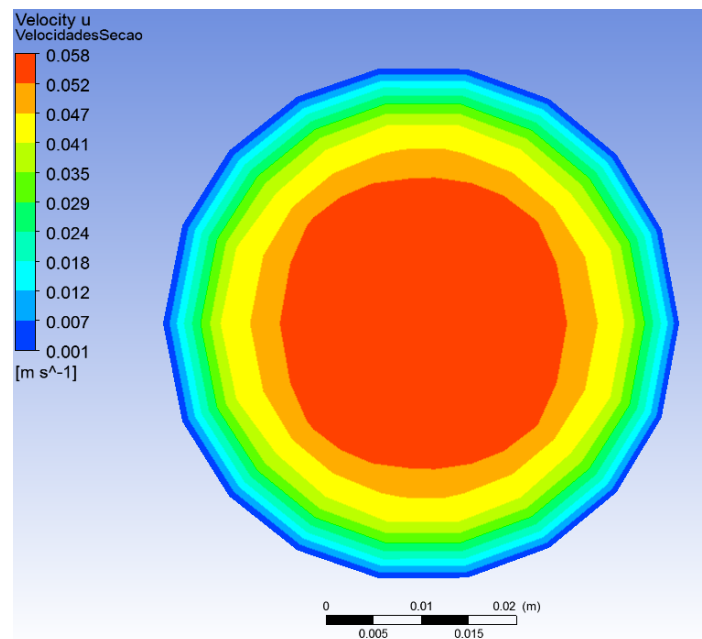
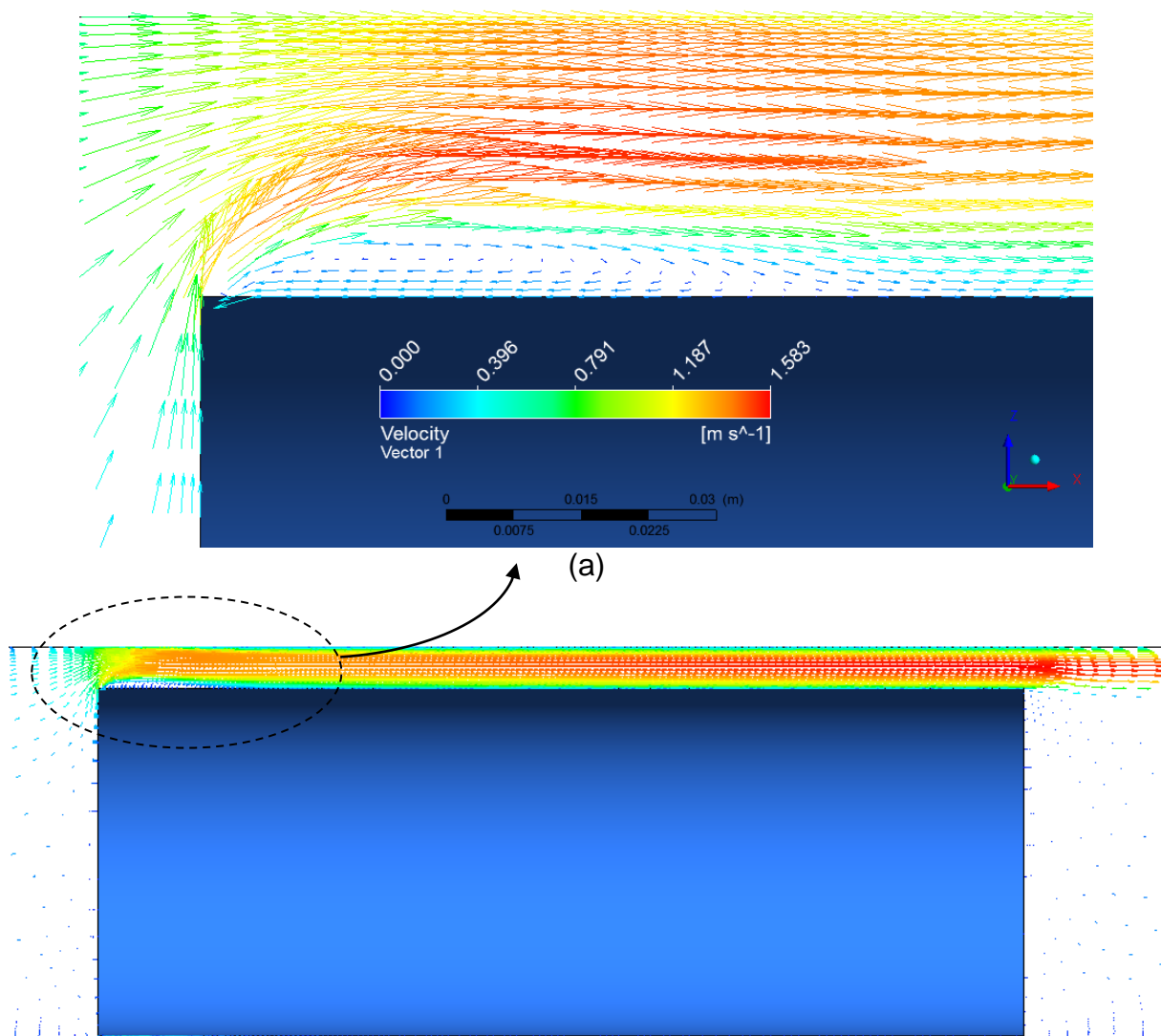


FIG. 5.5 Velocidades na seção cheia do tubo (caso 2)

Na FIG. 5.5, observa-se a distribuição de velocidades com direção axial na seção do tubo 20 cm à montante da cápsula, onde o escoamento ainda não sofreu interferência da mesma. Pode-se verificar ainda, um forte gradiente de velocidade junto à parede, alcançando o valor no máximo no centro do tubo.

Outro aspecto importante são os vórtices formados pela obstrução da cápsula observados experimentalmente (FIG. 5.1). Na FIG. 5.6 e FIG. 5.7 o método utilizado mostra com clareza a ocorrência deste vórtice, na forma de descolamento do fluxo, também conhecido por “bolha de separação” (ARAÚJO, 2012).

Tanto o modelo de turbulência SST quanto RTM apresentaram boa representação deste comportamento do localizado fluido. No entanto, neste caso, o modelo SST foi mais eficiente pois demanda uma menor carga computacional, tendo em vista a hipótese de isotropia da viscosidade turbulenta considerada.



(b)
 FIG. 5.6 Descolamento e recirculação na superior à montante (Caso 1)

Segundo LIU e RICHARDS (1994), a razão entre o comprimento deste descolamento e a diferença entre o diâmetro do duto e o diâmetro da cápsula é aproximadamente igual à 3. Nos modelos computacionais, a observação do escoamento nessa região demonstrou uma razão foi muito próxima desse valor.

Além do comprimento da zona de descolamento, é importante também a sua área crítica, cujo valor faz parte da definição do parâmetro C_c (coeficiente de contração) da EQ. 2.2. LIU e RICHARDS (1994) definem este parâmetro por

$$C_c = \frac{A_3}{A - A_c}, \quad \text{EQ. 5.8}$$

onde A é a área interna do tubo, A_c é a área da cápsula e A_3 é a área por onde há escoamento efetivo na seção crítica formada sobre a zona de descolamento (FIG. 5.1). A partir dos resultados referentes à FIG. 5.8, calcula-se $A_3 = 4,32 \text{ cm}^2$, que equivale à $C_c = 0,67$. O valor do coeficiente de contração estimado por LIU e RICHARDS (1994) a partir da complementação das equações desenvolvidas por dados experimentais é $C_c = 0,64$.

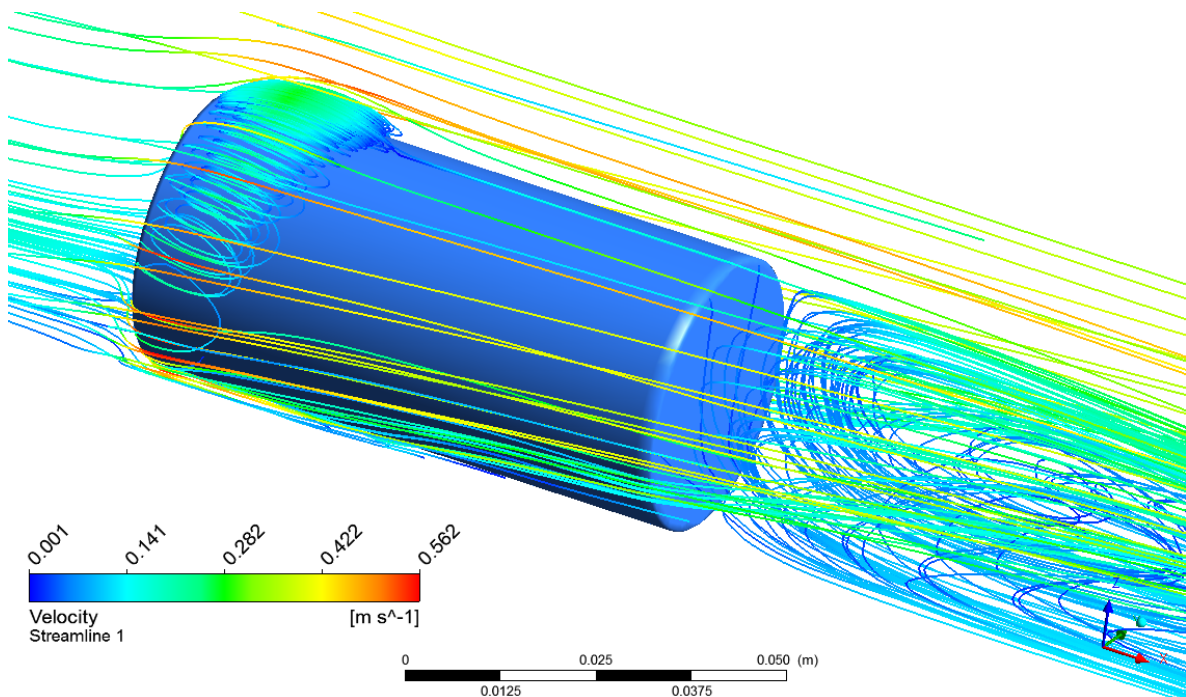


FIG. 5.7 Recirculação em torno da cápsula (caso 4)

Vale ressaltar que a contração não se deve, tão somente, pela ocorrência da zona de descolamento, mas também pelo maior estreitamento na parte inferior, o que faz o fluido tender a escoar na área superior. Tal fato pode ser observado através das linhas de corrente na FIG. 5.7.

A recirculação formada após a cápsula, contida numa região denominada “zona de esteira”, é evidenciada na FIG. 5.9. Suas características não são abordadas nas

pesquisas teóricas nem experimentais referenciadas, pois seu efeito já é contabilizado no coeficiente de perda de carga de entrada.

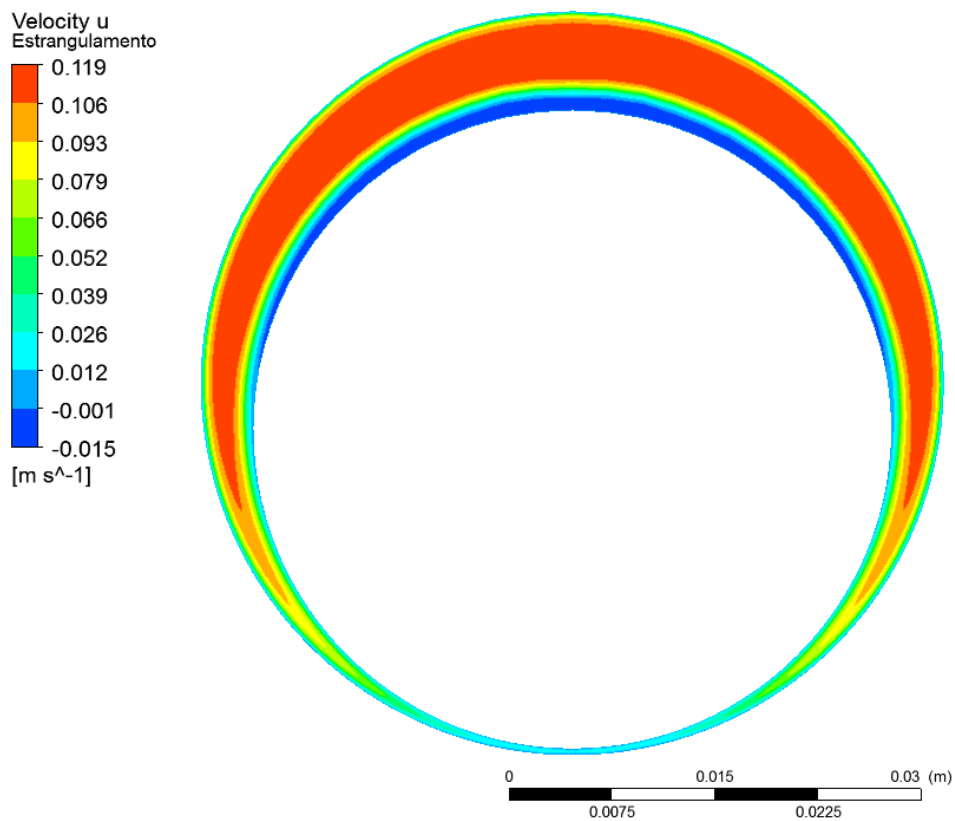


FIG. 5.8 Área de escoamento efetivo na seção crítica (caso 6)

Na prática, a turbulência que ocorre na zona de esteira causa uma queda na pressão neste local. Conseqüentemente, isto contribui para o impulsionamento da cápsula, pois tende a diminuir a força exercida pela pressão contrária ao seu movimento. Portanto, este se trata de um efeito desejável no transporte encapsulado, mas deve ser controlado para que a perda de carga no escoamento não seja excessiva e as flutuações de pressão não causem instabilidade no escoamento da cápsula.

Quanto às pressões, pode-se observar na FIG. 5.10 seus valores na geratriz superior da cápsula. No início do gráfico, há um súbito aumento da pressão,

causado pela obstrução do escoamento. A pressão então continua a subir, porém com menor aclave, devido à zona de descolamento do escoamento. Após esse trecho, há um decréscimo da pressão causado pela perda de carga entre a cápsula e a parede do tubo, que passa a ser o fator de maior relevância. O comportamento do gráfico está de acordo com o observado pelo experimento realizado por LIU e GRAZE (1983).

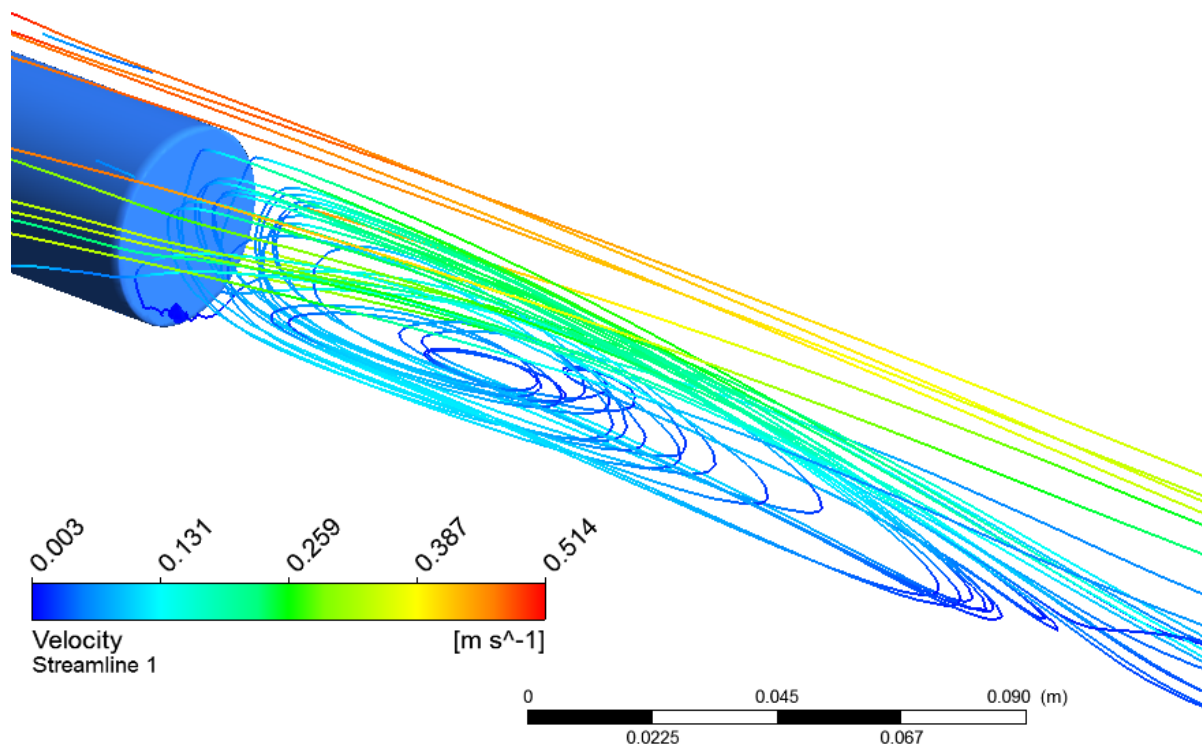


FIG. 5.9 Recirculação formada na região à jusante da cápsula (caso 4)

A incidência de uma pressão de menor valor na extremidade da cápsula à jusante do escoamento mostra que a força de levantamento resultante neste local é de maior intensidade e, portanto, será a primeira a perder contato com o inferior do tubo quando a velocidade do fluido for suficiente.

Pode-se observar na FIG. 5.11 a relação entre a força de arrasto aplicada na cápsula e a velocidade média do fluido. Conforme evidenciado no gráfico em questão, a força de arrasto devido ao atrito com a parede lateral da cápsula muito

pequena em relação à força de arrasto de forma, causada pela resultante das pressões atuando à montante e jusante da cápsula.

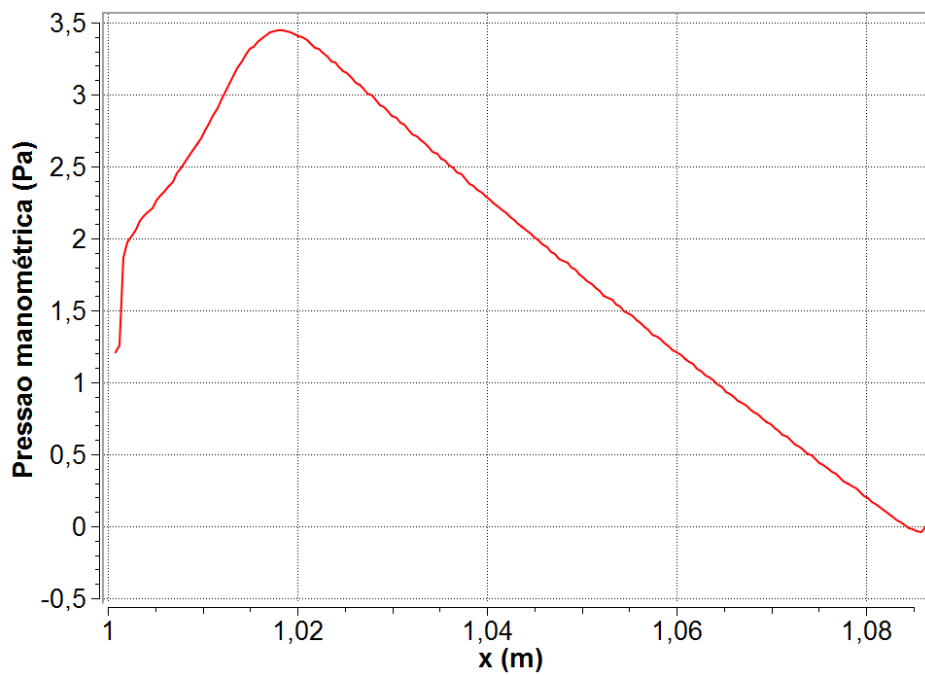


FIG. 5.10 Pressão manométrica na geratriz superior da cápsula (Caso 6)

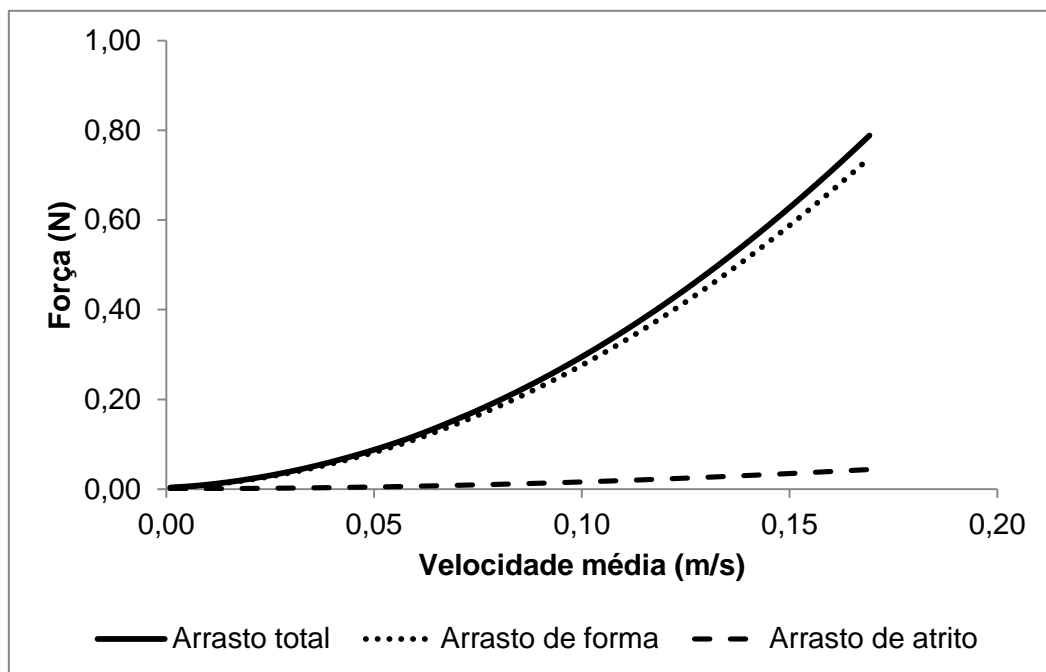


FIG. 5.11 Força de arrasto na cápsula (caso 5)

A intensidade da força de arrasto pode ser calculada empiricamente por:

$$F_D = C_D A_C \frac{\rho V^2}{2}, \quad \text{EQ. 5.9}$$

onde A_C é a área de seção da cápsula e C_D é o coeficiente de arrasto. Adotando-se o processo inverso, é possível se determinar o coeficiente de arrasto equivalente resultante das simulações. Para o caso da FIG. 5.11 (caso 5), o valor de C_D calculado empiricamente foi 30,4 e seu equivalente resultante da modelagem numérica é 29,6.

Após analisar todos os fatores citados anteriormente, conclui-se que o modelo computacional em questão está de acordo com o comportamento do fluido observado nos experimentos e mostra proximidade com análises quantitativas feitas em pesquisas teóricas. Portanto, conclui-se que todos os resultados obtidos possuem, no mínimo, uma boa precisão e confiabilidade.

Os resultados obtidos para a velocidade incipiente são apresentados na TAB. 5.2. Seus erros são calculados em relação aos valores médios das medições experimentais.

TAB. 5.2 Resumo dos resultados

| Caso | Modelo Experimental ⁽¹⁾ | | | | Modelo Empírico ⁽²⁾ | | Modelo Numérico | |
|------|------------------------------------|---------------|-----------------------|---------------|--------------------------------|----------|-----------------|----------|
| | Coeficiente de atrito | | Velocidade incipiente | | V _i | Erro (%) | V _i | Erro (%) |
| | Média | Desvio padrão | Média | Desvio padrão | | | | |
| 1 | 0,404 | 0,0302 | 0,066 | 0,0086 | 0,058 | -12,1 | 0,053 | -19,7 |
| 2 | 0,421 | 0,0523 | 0,047 | 0,0072 | 0,046 | -2,1 | 0,039 | -17,0 |
| 3 | 0,453 | 0,0520 | 0,224 | 0,0070 | 0,182 | -18,8 | 0,200 | -10,7 |
| 4 | 0,476 | 0,0378 | 0,164 | 0,0031 | 0,139 | -15,2 | 0,153 | -6,7 |
| 5 | 0,569 | 0,0262 | 0,092 | 0,0053 | 0,097 | 5,4 | 0,095 | 3,3 |
| 6 | 0,513 | 0,0339 | 0,066 | 0,0004 | 0,071 | 7,6 | 0,069 | 4,5 |
| 7 | 0,530 | 0,0317 | 0,053 | 0,0032 | 0,061 | 15,1 | 0,059 | 11,3 |

⁽¹⁾ RICHARD (1992)

⁽²⁾ GAO (2000)

Pode-se observar que, nos casos 1 a 4, tanto os resultados do modelo matemático quanto os resultados do modelo numérico apresentaram um erro

sistemático negativo e elevado. Por outro lado, para os casos 5 a 7, os erros foram positivos e menores. A principal diferença entre os dois grupos é o material de que a cápsula é feita, sendo acrílico nos primeiros casos e carvão nos últimos. Como a massa específica de ambos é, praticamente, a mesma e o par de casos com dimensões próximas, porém de grupos diferentes (casos 2 e 7), também apresentou grande divergência quanto ao sentido do erro, resta analisar a rugosidade superficial, do ponto de vista fluidodinâmico, e o coeficiente de atrito, do ponto de vista estrutural.

Conforme constatado por LIU e RICHARDS (1994), a rugosidade da superfície da cápsula tem pouca influência no valor calculado da velocidade incipiente, o que foi confirmado pelos resultados numéricos. Além disso, a consideração de qualquer valor de rugosidade para o acrílico, ao invés de assumida uma superfície lisa, faria com que os erros tendessem a serem maiores, pois tanto a perda de carga, quanto as tensões cisalhantes aumentariam, iniciando o movimento da cápsula com uma velocidade inferior à calculada.

Portanto, todos os fatores levam a crer que a única causa possível para a diferença das tendências dos erros entre as cápsulas de acrílico e as de carvão reside no cálculo do atrito.

Primeiramente, observa-se que o valor do desvio padrão para os coeficientes de atrito é relativamente elevado, chegando a mais de 12% da média, com os maiores índices referentes às cápsulas de acrílico, o que indica uma variação elevada deste coeficiente, ou um erro elevado de medição. Tal fato pode ser explicado pelo baixo valor de atrito do acrílico, o que torna as flutuações, devido a fatores diversos, bastante significativas. Nos quatro primeiros casos, por se tratar do mesmo material (acrílico), era esperado um mesmo valor de coeficiente de atrito. No entanto, há uma substancial diferença entre os valores apresentados, o que reforça a suspeita de um erro elevado nas medições desses atritos.

Além disso, a consideração do comportamento linear do atrito em função da força normal pode não ser muito precisa no caso de acrílico submerso, onde a área real de contato é grande, pois se trata de uma superfície lisa, e há água entre ela e a superfície de apoio (fundo do tubo). Vale ressaltar que os atritos foram obtidos

experimentalmente, inclinando-se o tubo até que a cápsula deslizesse, calculando-se então o coeficiente de atrito pela tangente do ângulo de inclinação. Desta forma, as condições em que o atrito é obtido (tubo inclinado), diferem daquelas na qual a velocidade incipiente é determinada (tubo horizontal).

Excluindo-se os testes com cápsulas de acrílico, uma vez que as cargas cogitadas para aplicação prática têm mais proximidade às características do carvão, os resultados numéricos para os três casos restantes apresentaram um erro médio de 6,4 %, que é inferior ao erro médio obtido pelos resultados teóricos, que, para os mesmos casos, foi igual a 9,4 %.

Outra observação interessante é a variação do erro obtido teoricamente ao longo dos três últimos casos foi semelhante ao obtido numericamente. Este é um indicativo de que boa parcela dos erros esteja nas medições experimentais. No experimento, em questão, realizado por RICHARDS (1992), a vazão volumétrica era medida através de um hidrômetro magnético, que, certamente, não é a maneira mais precisa para se medir esta grandeza.

Também foi implementado um modelo referente ao experimento realizado por LIU e GRAZE (1983), no qual foram medidas as pressões em diversos pontos na superfície de uma cápsula sob regime permanente de escoamento da água. A comparação entre os resultados obtidos experimentalmente e numericamente é apresentada nas FIG. 5.12, FIG. 5.13 e FIG. 5.14.

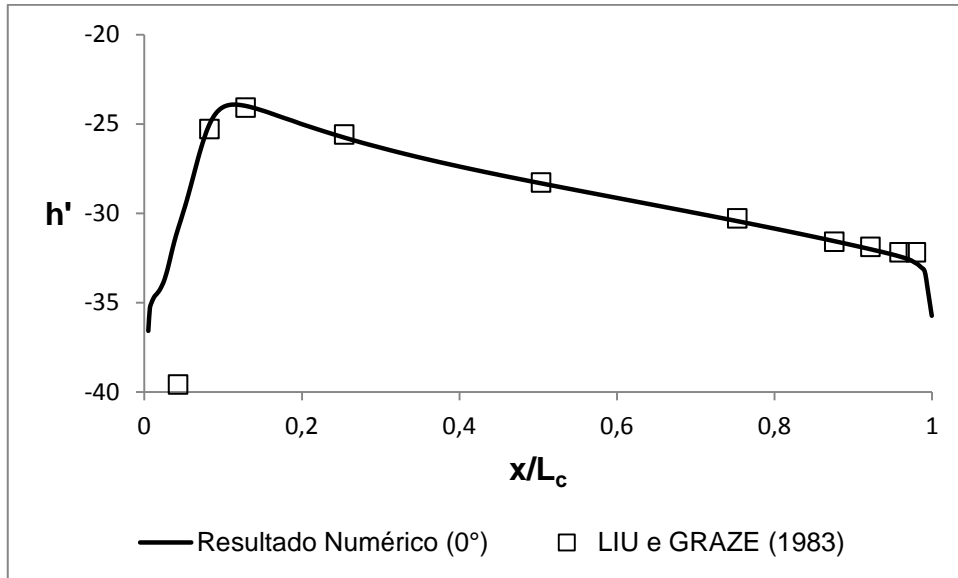
As pressões mostradas no gráfico referem-se àquelas encontradas numa linha sobre a superfície da cápsula com sentido longitudinal e posicionada num ângulo θ da coordenada cilíndrica com origem no eixo da cápsula. Os valores experimentais correspondem à média obtida entre os dois pontos simétricos (e.g.: $\theta=30^\circ$ e $\theta=-30^\circ$). Em muitos casos, houve uma discrepância entre esses valores experimentais, tendo em vista que, pela simetria geométrica do problema, estes deveriam ser muito próximos.

Para a representação gráfica, o autor propõe a utilização de uma medida adimensional para a pressão, calculada por:

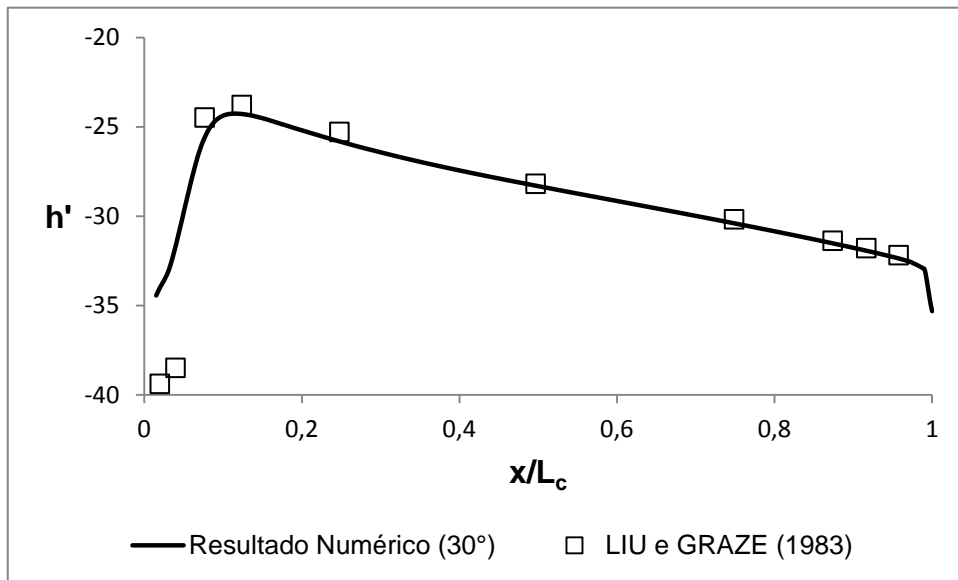
$$h' = \frac{2g(h-h_0)}{V^2},$$

EQ. 5.10

onde h é medida de altura manométrica da pressão, h_0 é a medida equivalente ao referencial da bancada e V é a velocidade média do escoamento.

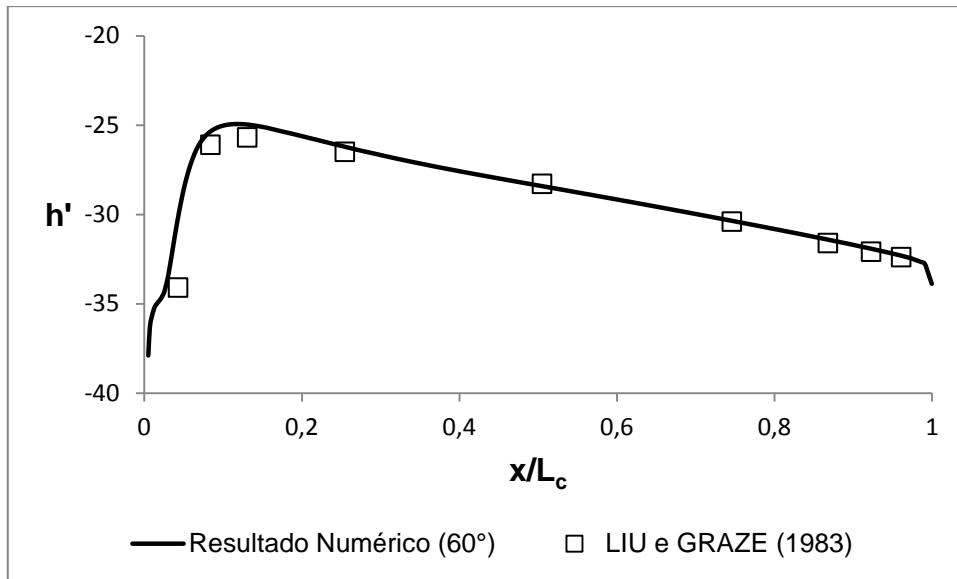


(a)

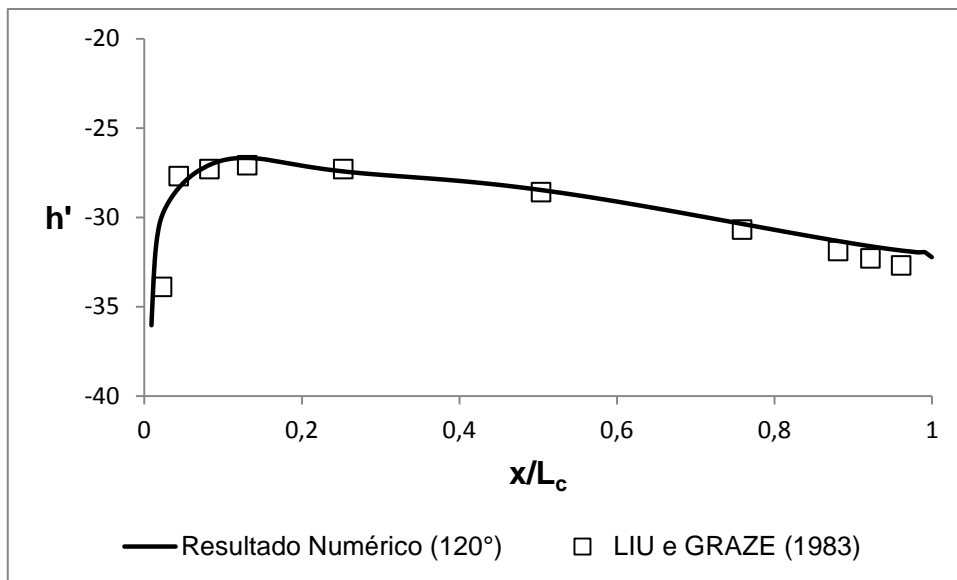


(b)

FIG. 5.12 Pressões na superfície da cápsula em $\theta=0^\circ$ (a) e $\theta=30^\circ$ (b)



(a)

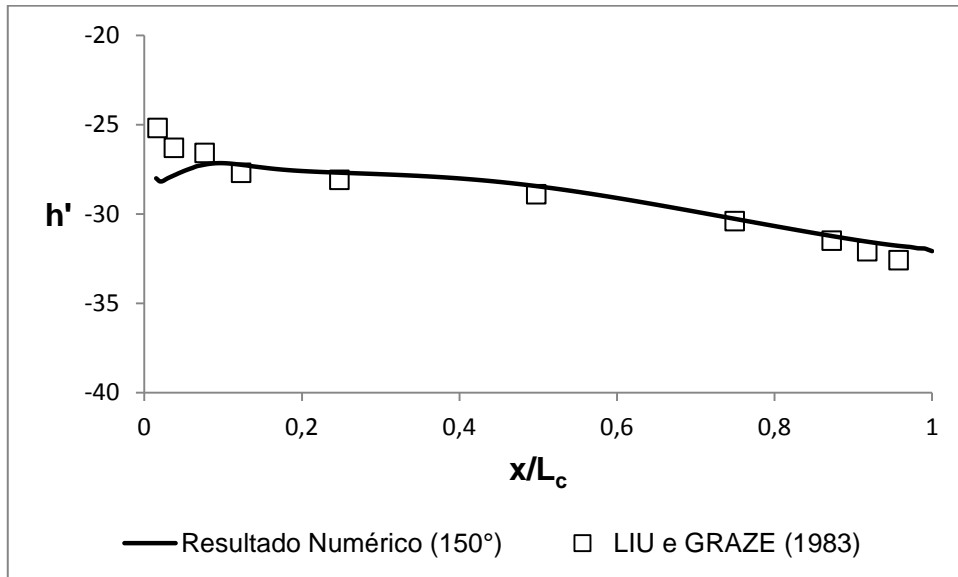


(b)

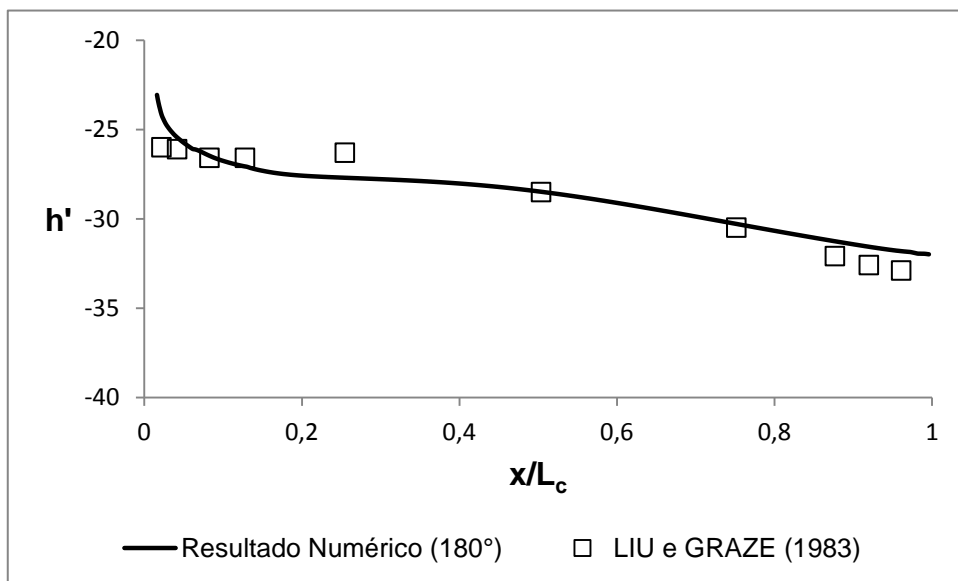
FIG. 5.13 Pressões na superfície da cápsula em $\theta=60^\circ$ (a) e $\theta=120^\circ$ (b)

Observa-se uma proximidade muito grande entre os resultados, exceto para a região dos dois primeiros pontos medidos. Esta região, compreendida pelos primeiros centímetros da cápsula, é altamente susceptível à geometria das arestas na extremidade da cápsula. Além disso, nos valores medidos experimentalmente nesta região, houve uma grande diferença entre os pontos simétricos (lados opostos da cápsula), o que aponta para alguma imperfeição no modelo físico. Portanto, atribui-se este erro à forma arredondada destas arestas, cujas dimensões precisas

são desconhecidas, e ao provável erro experimental elevado nos primeiros pontos. No entanto, qualquer que seja a origem deste erro, ele é localizado e não interfere significativamente no comportamento do fluido no restante do domínio e, conseqüentemente, nem na resultante das forças atuantes na cápsula.



(a)



(b)

FIG. 5.14 Pressões na superfície da cápsula em $\theta=150^\circ$ (a) e $\theta=180^\circ$ (b)

6. CONCLUSÃO

Na presente dissertação foi estudado o transporte em dutovias do tipo encapsulado. As principais pesquisas já existentes sobre o assunto foram abordadas, com ênfase em suas contribuições para a análise e desenvolvimento desta variação do modal dutoviário.

O transporte encapsulado em dutovias mostrou ser uma promissora alternativa para o deslocamento de cargas em grandes distâncias e com capacidade de transporte elevada. Alguns estudos já realizados apontam para uma viabilidade técnica e econômica desta tecnologia, que apresenta, entre diversos fatores positivos, baixos custo e emissão de poluentes, devido à sua elevada eficiência.

As cápsulas hidráulicas (HCP) tem potencial para transporte de carvão e resíduos sólidos, entre outras cargas que possam ser compactadas em formatos resistentes à água e a choques na parede do duto. Quanto às cápsulas pneumáticas (PCP), sua aplicação pode incluir diversos tipos de carga, variando desde correspondências até agregados.

Quanto ao estudo da velocidade incipiente realizado para HPC, os resultados dos modelos computacionais mostraram em, praticamente, todos os casos consistência em relação aos obtidos através de equações empíricas. Na comparação com os resultados experimentais de velocidade incipiente, nos casos de cápsulas de carvão, houve uma boa precisão, com erro médio de 6,4%, significativamente inferior aos das equações empíricas encontradas na literatura. Já para os casos ensaiados com cápsulas de acrílico, os erros dos resultados numéricos foram elevados, o que também ocorreu com as equações empíricas. Entretanto, diversos indícios apontam para uma maior concentração do erro nas considerações e ensaios feitos em relação ao atrito.

Nos modelos em regime permanente, onde se analisou a distribuição de pressões na superfície da cápsula, os resultados computacionais foram de grande precisão em relação aos dados experimentais, mostrando perfeita adequação do modelo de turbulência adotado ao fenômeno físico, tendo em vista as dificuldades apresentadas em se realizar estudos em CFD.

Portanto, a modelagem computacional se mostrou uma eficiente ferramenta para análise do comportamento de cápsulas hidráulicas, uma vez que pode ser realizada em um curto prazo de tempo e seus resultados são confiáveis. As informações obtidas através destas análises são de fundamental importância como subsídios para o desenvolvimento de futuros projetos de HCP.

A modelagem fluido-estrutural adotada permite que as análises sejam estendidas ao cálculo da velocidade crítica e da velocidade de sustentação, além da interferência entre cápsulas em sequência (trens), incluindo possíveis choques de uma determinada cápsula com a cápsula adjacente ou com a parede interna do tubo. A intensidade dos choques pode ser um parâmetro considerado para a resistência mínima das cápsulas moldadas ou determinação da velocidade ideal de operação

Trabalhos futuros poderiam estender tal análise para o comportamento de PCP, onde o fluido modelado, ao invés de água, seria o ar. Toda a metodologia adotada neste trabalho aplica-se também ao ar, que se trata de um fluido incompressível.

Após a realização dos estudos necessários, apontados neste trabalho, e com o devido incentivo à pesquisa, será possível a construção de um projeto piloto que poderá corroborar todas as conclusões obtidas até então, comprovando, definitivamente, a viabilidade e aplicabilidade do transporte encapsulado em dutos.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS (ASCE). **Fright pipelines: current status and anticipated future use**. Journal of transportation engineering, EUA, v. 124, n. 4, julho/agosto 1998.
- ARAÚJO, Fernando N. **Modelagem da Turbulência Aplicada ao Escoamento sobre uma Placa Inclinada**. 2012. 128p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Instituto Militar de Engenharia – IME, 2012.
- BEACH, A.E. **The Pneumatic Tunnel Under Broadway**. Scientific American, EUA, [online] 5 mar. 1870. Disponível: http://www.nycsubway.org/wiki/Beach_Pneumatic_Transit [capturado em 11 jul. 2012]
- BERTRAM, C.D., TIMMER, J., MÜLLER, T.G. **Aperiodic flow-induced oscillations of collapsible tubes: a critical reappraisal**. Medical Engineering & Physics [online], 2004. Disponível: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S135045330300198X> [capturado em 14 jan. 2013]
- CARTER, Jonathan, TROYANO-CUTURI, Kevin. **Capsule Pipelines for Aggregate Transport: History**. Imperial College, Department of Earth Science and Engineering [online]. London, 2009. Disponível: <http://www3.imperial.ac.uk/earthscienceandengineering/research/energyenvmod/min/capsule/history> [capturado em 05 nov. 2012].
- CARTER, Jonathan, TROYANO-CUTURI, Kevin. **Capsule Pipelines for Aggregate Transport: Costs Comparison**. The Aggregates & Recycling Information Network – Agg-Net [online]. London, 2010. Disponível: <http://www.agg-net.com/resources/articles/capsule-pipelines-for-aggregate-transport> [capturado em 01 ago. 2012].
- CENTRO DE EXCELÊNCIA EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES (CENTRAN). **PLANO NACIONAL DE LOGÍSTICA E TRANSPORTES – PNLT**. [online]. Abr. 2009. Disponível: <http://transportes.gov.br/index/conteudo/id/3280> [capturado em 6 ago. 2011]
- CHENG, C. C. **Wear and damage of coal logs in pipelines**. 1994. 694p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – University of Missouri-Columbia, 1994.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTE (CNT). Boletim Estatístico [online]. Mar. 2012. Disponível: <http://www.cnt.org.br/Paginas/Boletins.aspx> [capturado em 7 out. 2012]
- EGBUNIKE, Obiajulu N., POTTER, Andrew T. **Are freight pipelines a pipe dream? A critical review of the UK and European perspective**. Journal of Transport

- Geography, 2010. Disponível: www.journals.elsevier.com [capturado em 28 nov. 2011]
- FENG, J. **Dynamic simulation of the motion of capsules in pipelines**. Journal of Fluid Mechanics, Cambridge, v. 286, 1995.
- FLEURY, Paulo F. **Custos Logísticos e Competitividade Internacional**. São Paulo, 15 jun. 2011 Palestra ministrada no 6º Encontro de Logística e Transportes – FIESP. Disponível: <http://fiesp.com.br/logistica/ppt/paulofleury-110617125327-phpapp02.pdf> [capturado em 9 maio 2012]
- FOX, Robert W., MCDONALD, Alan T., PRITCHARD, Philip J. **Introduction to Fluid Mechanics**. 6. ed. EUA: John Wiley & Sons, Inc. 2004. 787 p. il. ISBN 0-471-20231-2.
- FUJIWARA, Yoshinari, TOMITA, Yuji, SATOU, Haruo, FUNATSU, Katsuya. **Characteristics of Hydraulic Capsule Transport**. JSME International Journal, v. 37, n. 1, 1994.
- GAO, Xiang, LIU, Henry. **Predicting Incipient Velocity of Capsules in Pipe**. Journal of Hydraulic Engineering, EUA, v. 126, n. 6, junho 2000.
- HODSON, Noel. **Pneumatic Transport – State of Art – Desk Research**. [online]. 2007. Disponível: http://www.noelhodson.com/index_files/StateoftheArt-foodtubes2FEB07.htm [capturado em 03 ago. 2012]
- HOWGEGO, Timothy, ROE, Michael. **The use of pipelines for the urban distribution of good**. Transport Policy, v. 5, n. 2, 1998.
- KAEMPFERT, Waldemar. **New York's First Subway**. Scientific American, EUA, , v. 106, p. 176-177, 24 fev. 1912.
- KHALIL, Mohamed F., KASSAB, Sadek Z., ADAM, Ihab G. **Prediction of Lift and Drag Coefficients on Stationary Capsule in Pipeline**. 13th International Water Technology Conference, 7., 2009, Egito.
- KHALIL, Mohamed F., KASSAB, Sadek Z., Adam, Ihab G., SAMAHA, Mohamed A. **Turbulent flow around single concentric long capsule in a pipe**. Applied Mathematical Modelling, 20 de outubro de 2009. Disponível: www.journals.elsevier.com [capturado em 28 nov. 2011]
- LENAU, C.W., EL-BAYYA, M.M. **Unsteady Flow in Hydraulic Capsule Pipeline**. Journal of Engineering Mechanics, v.122, n. 12, dez. 1996
- LIU, Henry. **Hydraulic behavior of coal log flow in pipe**. In: 7th International Symposium on Freight Pipelines, 7., 1992, Australia. Barton, ACT: Institution of Engineers, Australia, 1992. p. 201 – 205.
- LIU, Henry. **Pneumatic Capsule Pipeline – Basic Concept, Practical Considerations, and Current Research**. MID-CONTINENT TRANSPORTATION SYMPOSIUM, 230., 2000, Iowa. Anais eletrônicos Iowa

- State University [online]. Iowa, EUA, 2000. Disponível: <http://www.ctre.iastate.edu/pubs/midcon/liu.pdf> [capturado em 13 ago. 2012]
- LIU, Henry. **Pipeline Engineering**. 1 ed. Florida: CRC Press LLC, 2005. 411 p. il. ISBN 0-203-50668-5.
- LIU, Henry. **Transporting Freight Containers by Pneumatic Capsule Pipeline (PCP): Port Security and Other Issues**. U.S. Transportation Research Board (TRB) Meeting, 2006, California/EUA.
- LIU, Henry, GRAZE, Harald R. **Lift and Drag on Stationary Capsule in Pipeline**. Journal of Hydraulic Engineering, EUA, v. 109, n. 1, janeiro 1983.
- LIU, Henry, LI Yadong. **Transporting Solid Wastes by Pipelines – A Feasibility Analysis**. Environmental and Pipeline Engineering, ASCE. EUA, 2000.
- LIU, Henry, NOBLE, James S., WU, Jianping, ZUNIGA, Robert. **Economics of Coal Log Pipeline for Transporting Coal**. Transportation Research Part A: Policy and Practice, Grã-Bretanha, v. 32, n. 5, 1998.
- LIU, Henry, RICHARDS, James L. **Hydraulics of Stationary Capsule in Pipe**. Journal of Hydraulic Engineering, EUA, v. 120, n. 1, janeiro 1994.
- LUO, Yu, MOHAMMAD, Najafi, LIU, Henry. **Evaluation of Construction Cost of Underground Tunnels for Large Diameter Pneumatic Capsule Pipelines**. 5th International Symposium on Underground Fright Transportation by Capsule Pipelines and Other Tube/Tunnel Systems - ISUFT, 2008, Arlington/EUA.
- MAJUNDAR, Sekhar. **Role of Enderrelaxation in Momentum Interpolation for Calculation of Flow with Nonstaggered Grids**. Numerical Heat Transfer, v. 13, n. 1, 1988.
- MENTER, F. R. **Two-Equation Eddu-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications**. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., Washington/EUA, v. 32, n. 8, julho 1993.
- MURTA, Aurélio L. S. **Subsídios para o Desenvolvimento de Estudos de Impactos Ambientais para Projetos de Transporte Dutoviário**. 2003. 134p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Instituto Militar de Engenharia, 2003.
- NEW YORK STATE ENERGY RESEARCH AND DEVELOPMENT AUTHORITY (NYSERDA). **Feasibility of Enderground Pneumatic Freight Transport in New York City**. New York, 2004. 92 p.
- PLODPRADISTA, Wisuwat. **Dynamic Performances of Tubular Linear Induction Motor for Pneumatic Capsule Pipeline System**. International Journal of Electrical and Computer Engineering, v. 5, n. 4, jun. 2010.
- RICHARDS, James L. **Behavior of Coal Log Trains in Hydraulic Transport Through Pipe**. 1992. 210p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) –

- University of Missouri-Columbia, 1992.
- ROBERTS, Carla (fpc_carla@yahoo.com) **Re: Capsule pipeline research.** E-mail para NASCIMENTO, G. C. (gcnascimento@ime.eb.br) [mensagem capturada em 31 jul. 2012]
- SANGINETO, Mariane L. T. Um algoritmo Genético para a Programação de Transferências em um Poliduto. 2006. 93 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2006.
- SEOANE, Tati. **Coleta de Lixo Subterrânea e à Vácuo.** PINI Web, 2012 [online]. Disponível: <http://www.infraestruturaurbana.com.br/solucoes-tecnicas/11/artigo245157-1.asp> [capturado em 4 dez. 2012]
- SPEZIALE, Charles G., SARKAR, Sutanu, GATSKI, Thomas B. **Modeling the Pressure-Strain Correlation of Turbulence – an Invariant Dynamical Systems Approach.** Institute for Computer Applications in Science and Engineering – NASA Langley Research Center, Virginia/EUA, ICASE Report n. 90-5, jan. 1990.
- THE WALES FREIGHT STRATEGY. **Welsh Assembly Government,** Gales, Maio de 2008. Disponível: <http://wales.gov.uk> [capturado em 17 dez. de 2012].
- WEAVER, Brink (brink@thornegrouptech.com) **Re: Capsule information.** E-mail para NASCIMENTO, G. C. (gcnascimento@ime.eb.br) [mensagem capturada em 5 mai. 2012]
- WHITE, Frank M. **Fluid Mechanics.** 4. ed. McGraw-Hill, 2006. 896 p. il. ISBN 0073309206.
- WILCOX, David C. **Turbulence Modeling for CFD.** 1. Ed. DCW Industries, Inc., 1993. 460 p. il. ISBN 0-9636051-0-0
- WROBEL, Luis C., EIGER, S., ROSMAN, Paulo C. et al. **Métodos numéricos em recursos hídricos.** 1. ed. Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Recursos Hídricos – ABRH, 1989. 380 p. il. ISBN 85-85309-01-6.
- ZHAO, Xiaodong. **Mechanistic-Based Models for Slug Flow in Vertical Pipes.** 2005. Tese (PhD) – Texas Tech University, 2005.