

«ESTUDO DE TUBULAÇÕES ATRAVÉS DE MODELOS»^(*)

Gen. Div. Eng.º LEONINO JUNIOR

«Teorize tudo o que quiser,
mas experimente»
(Willys B. Whitney)

1 — INTRODUÇÃO

Atendendo ao honroso convite que nos foi endereçado, pretendemos fazer, nas páginas que se seguem e para apresentação no tempo de uma hora que nos foi destinado, um breve resumo, simples e objetivo, do que de mais interessante e útil existe, ao nosso ver, nos domínios da prática e da experimentação, no que diz respeito ao estudo hidráulico de tubos, através de modelos reduzidos.

Nesse setor, podemos dizer inicialmente que as aplicações são as mais variadas, não existindo limitações quanto aos casos em que os recursos da experimentação seriam cabíveis.

Muito vasto e diversificado portanto seria o assunto, se desejássemos abordá-lo sob todos os aspectos segundo os quais poderia ser considerado,

nos amplos campos das aplicações dos domínios da engenharia hidráulica. Seria então impossível tratá-lo devidamente, neste reduzido espaço de tempo, com as características que pretendemos dar a nossa apresentação. Assim sendo, julgamos ser mais conveniente fazer, no ítem que se segue, uma apreciação geral sobre o problema, daí destacando então os aspectos que, ao nosso ver, seriam úteis e importantes dentro das finalidades visadas, compatíveis com os objetivos e o nível deste Curso.

Por outro lado, também implicaria em grande desenvolvimento, se fossemos abordar os aspectos gerais da semelhança e da experimentação dentro da engenharia hidráulica. Preferimos então, situar inicialmente o assunto no campo geral da experimentação, para em seguida passar a tratar dos detalhes que julgamos mais úteis e aplicáveis às finalidades deste curso.

Consultando o programa geral que nos foi fornecido, verificamos todavia que, dentre todos os importantes e excelentes temas programados, o único que se refere à técnica experimental é o nosso. Assim, para aqueles que não dispuserem de conhecimentos mais profundos sobre os aspectos gerais do problema, ou ainda, para os que desejarem maiores detalhes ou esclarecimentos

(*) Este trabalho foi apresentado, sob a forma de conferência, no «Curso de Tubulações Hidráulicas», realizado pelo Departamento de Hidráulica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, em maio do corrente ano. No intuito de dar maior divulgação ao assunto, que julgamos ser de interesse geral de todos aqueles que, em nosso país, tem suas atividades voltadas para o emprego de tubulações, foi que resolvemos publicá-lo nesta revista, que mais uma vez muito nos honra, aceitando nossa colaboração. — O autor.

sobre a vasta e importante técnica experimental nos domínios da hidráulica, fornecemos, no fim deste trabalho, uma lista de referências bibliográficas, na qual procuramos incluir as melhores obras, antigas e recentes, que poderiam servir de base para um estudo e uma análise bem mais profunda dos assuntos tratados, desde as condições gerais de semelhança, até os mais diversificados setores de aplicações.

Procuraremos fugir às deduções gerais teóricas e complexas e preferiremos nos concentrar nos aspectos práticos, reais e mais frequentes, relacionados com o tema, que ao nosso ver constituirão a fonte principal dos casos mais comumente encontrados na vida prática, assim julgando estar de acordo não só com as finalidades do curso, como também com os interesses da maioria dos participantes.

As páginas que se seguem portanto não se destinam aos conhecedores, aos especialistas no assunto. Elas visam sim, a maioria dos que aqui certamente estão presentes, procurando, ao nosso ver, adquirir conhecimentos básicos, aplicáveis aos casos especiais abrangidos pelo curso. Essas as razões pelas quais deixaremos de nos aprofundar inutilmente nos amplos aspectos teóricos e práticos, que o assunto certamente comporta.

2 — ASPECTOS GERAIS DO PROBLEMA

2.1 — As Bases Teóricas

O modelo, de um modo geral, constitui atualmente uma formidável e precisa ferramenta de trabalho, de investigação e de pesquisas, dentro dos mais variados campos das ciências, da técnica e da engenharia.

Pode-se dizer mesmo, sem o receio de cometer exageros, que modernamente nenhum projeto de vulto e de responsabilidade poderá ser executado, sem o auxílio inestimável da experimentação e dos modelos, quaisquer que sejam eles.

O conceito de modelo, todavia, modernamente já evoluiu bastante e essa denominação é empregada com aceção bem mais ampla do que o era há alguns anos atrás, dadas as variadas modalidades segundo as quais é atualmente o modelo empregado.

Pode-se definir modernamente o modelo como um sistema, por meio do qual um outro sistema real, denominado de protótipo, que com ele guarda relações físicas ou matemáticas, poderá ser simulado e estudado. Conforme estamos vendo portanto, o conceito moderno de modelo não implica necessariamente em semelhança de formas, como antigamente se admitia.

Quanto às bases teóricas e matemáticas, se bem que permaneçam os fundamentos anteriores, os recursos se ampliaram profundamente, principalmente nos domínios das analogias e da computação eletrônica. Os estudos experimentais modernos, relacionados com a hidráulica, envolvem conhecimentos dos seguintes principais assuntos:

- 1 — Estatística.
- 2 — Física.
- 3 — Mecânica Teórica.
- 4 — Termodinâmica.
- 5 — Mecânica dos Fluidos.
- 6 — Teoria Dimensional.
- 7 — Teoria de Semelhança.
- 8 — Eletricidade e Eletrônica.
- 9 — Computação Eletrônica.

Evidentemente, dentre os assuntos acima, cabe à Teoria Dimensional o principal papel, graças as possibilidades que dá ao experimentador de estabelecimento das relações fundamentais de semelhança de que necessita para cada caso.

Destaque-se como elemento básico nos vastos domínios dessa teoria, o clássico teorema dos π (pi) ou Teorema de Buckingham, cujo enunciado, como lembrete, aqui reproduzimos:

«Em um problema físico, incluindo n grandezas, nas quais existem m dimensões, as grandezas podem ser dispostas em $n - m$ parâmetros adimensionais».

Para cada estudo, para cada problema, nos mais diversificados e praticamente ilimitados domínios das aplicações, cumpre ao experimentador bem selecionar, deduzir e empregar as relações matemáticas em que deverá fundamentar o seu trabalho.

2.2 — Os Tipos de Modelos

Podemos classificar os diferentes tipos de modelos atualmente em uso nas seguintes categorias:

- Modelos com semelhança de formas
- Modelos sem semelhança de formas

Os modelos com semelhança de formas constituem, no nosso caso, os chamados modelos hidráulicos ou modelos reduzidos, dentro de cuja categoria iremos situar principalmente o nosso trabalho.

Quanto aos modelos sem semelhança de formas, incluímos os modelos analógicos e os modelos matemáticos, que também poderão ter aplicações em nosso caso, especialmente nos domi-

nios das analogias elétricas e dos chamados transientes hidráulicos.

Denominamos de modelos analógico àquele que mantém com o protótipo relações físicas e matemáticas, muito embora se trate de fenômenos fisicamente diferentes. São clássicas, por exemplo, as relações analógicas entre fenômenos elétricos e fenômenos hidráulicos.

Denominamos de modelo matemático àquele que se liga ao protótipo, através de relações matemáticas. É o caso típico de estudo de problemas hidrológicos com o auxílio da computação eletrônica, pelo emprego de modelos que traduzem matematicamente as ocorrências.

Um modelo hidráulico é dito não deformado quando a mesma relação de escala geométrica é aplicável a todas as suas dimensões. Ele será deformado quando isso não acontecer. Evidentemente, neste último caso, a clássica semelhança física fica prejudicada, com os evidentes inconvenientes de ordem psicológica que isso causa para os leigos que observam o modelo.

2.3 — Fluidos empregados

As condições normais de trabalho nos modelos hidráulicos permitem que, graças ao emprego das relações de semelhança, apenas dois fluidos de facilíma obtenção e de custo desprezível sejam usados: o ar e a água. Nisso reside um dos aspectos práticos fundamentais, que tornam o modelo hidráulico vantajoso, quando comparado com outros tipos de modelos, sob o aspecto econômico. Posteriormente citaremos as relações e as condições que nos permitirão que isso seja feito, com a aplicação dos resultados para outros fluidos quaisquer.

2.4 — As Qualidades do Experimentador

Aspecto muito importante, geralmente esquecido ou menosprezado em nosso meio, que desejamos destacar nestas considerações iniciais que estamos fazendo, reside nas qualidades a serem exigidas de um experimentador, para que ele bem possa desempenhar a sua tarefa.

Experiência, pesquisa, exige, antes de mais nada pendores, vocação, qualidades especiais, e só as tem quem já nasceu com elas, quem tem temperamento para isso, e que apenas, na vida profissional, revelou essas aptidões e teve então oportunidade para aplicá-las, desenvolvê-las e aperfeiçoá-las.

Um pesquisador ou experimentador não se improvisa, escala ou obriga. Eis aí uma das grandes verdades que é preciso proclamar sempre em nosso meio, perante certos espíritos ou mentalidades não esclarecidas.

Destacamos dentre as qualidades fundamentais que devam formar o temperamento de um experimentador:

1.º — Paciência, habilidade.

2.º — Espírito de improvisação, inventividade, engenhosidade.

3.º — Amor ao detalhe e à minúcia.

4.º — Amor à Ordem, ao método, à clareza.

5.º — Temperamento tranquilo e espírito de investigação.

Tudo isso e mais, com o tempo, com dedicação, com estudos, com firmeza, com tenacidade e objetividade:

6.º — Experiências, tirocínio, amadurecimento profissional, visão ampla e bem formada de técnico, de cientista, de pesquisador, de investigador.

Sem isso tudo senhores, sem tudo isso, muito bem amparado, muito bem compreendido, muito bem estimulado, não se pode pensar em realizar algo nos domínios da experimentação e da pesquisa em nosso país, nos campos da hidráulica.

Eis as considerações que julgamos oportuno fazer, destacando resumidamente os aspectos gerais do problema.

3 — AS RELAÇÕES DE SEMELHANÇA

3.1 — Tipos de Estudos

Os estudos experimentais que podem ser realizados em tubulações com característicos de condutos forçados, podem estar relacionados com os seguintes tipos de problemas:

a — Perdas de carga normais ou acidentais. Características de rugosidade.

b — Fenômenos de transientes hidráulicos (golpes de ariete, propagação de ondas elásticas, etc.).

c — Problemas relacionados com a associação de tubos (redes, ramificações, derivações, etc.).

d — Condutos com formas ou finalidades especiais (tais como condutos forçados de usinas hidrelétricas, sifões, condutos de derivação, etc.).

e — Estados ligados ao transporte sólido.

f — Outros tipos de problemas ou estudos não relacionados acima, porém ligados ao mesmo tipo de conduto.

Todos os casos acima, todos os problemas considerados no nosso caso, estão incluídos na grande categoria prática dos escoamentos **sem**

superfície livre, onde existe tipicamente o conduto forçado ou onde o corpo considerado se desloca submerso, em um meio fluido considerado ilimitado, sem superfície livre.

Os recursos a empregar, os tipos de modelos a executar, já foram citados, de modo generalizado, no item 2.

Repetimos aqui, mais uma vez, que dadas as limitações de tempo, iremos abordar apenas os aspectos que, ao nosso ver, constituem os casos mais importantes e frequentes dos problemas citados.

Qualquer que seja o problema a estudar, dentre os acima mencionados, necessita o experimentador apoiar os seus estudos e analisar seus resultados com base em relações e escalas de semelhança, obtidas através do emprego de números típicos, que nada mais são do que relações adimensionais, resultantes de balanceamento entre as forças que predominam em cada caso abordado.

Faremos a seguir algumas considerações de ordem geral sobre os números em apreço.

3.2 — Os Números Típicos

Todo o estudo experimental de tubulações, em modelos reduzidos, é fundamentado na aplicação criteriosa de condições de semelhança, obtidas pela utilização de relações adimensionais clássicas da Mecânica dos Fluidos, que constituem os chamados **números**, e que nada mais são do que um balanceamento das forças principais que predominam em cada caso que está sendo estudado.

Empregando as relações clássicas da Mecânica, teremos as seguintes expressões para as forças principais postas em jogo em cada caso:

— Forças de inércia:

$$M \cdot a = \rho \frac{L^3 V^3}{L} = \rho \cdot L^2 V^2$$

— Forças viscosas:

$$\tau \times A = \left(\frac{dV}{dy} \right) L^2 = \mu \left(\frac{V}{L} \right) L^2 = \mu VL$$

— Forças gravitacionais:

$$Mg = \rho L^3 g$$

— Forças de compressibilidades:

$$K \cdot L^2$$

Nas expressões acima, as anotações empregadas tem o seguinte significado:

M = massa

K = módulo de elasticidade (compressibilidade)

a = aceleração

τ = tensão tangencial

A = área

μ = viscosidade absoluta

L = comprimento

V = velocidade

ρ = massa específica

g = aceleração da gravidade

Estabelecido o relacionamento entre as forças acima, consideradas como predominantes em cada caso que está sendo estudado, teremos os seguintes números típicos principais, empregados para a caracterização dos fenômenos mais frequentes nos domínios da Hidráulica:

— Número de Reynolds:

$$[NR] = \frac{\text{Forças de inércia}}{\text{Forças viscosas}} = \frac{\rho L^2 V^2}{\mu V \cdot L} = \frac{\rho L V}{\mu}$$

— Número de Froude:

$$[NF] = \frac{\text{Forças de inércia}}{\text{Forças gravitacionais}} = \frac{\rho L^2 V^2}{\rho L^3 g} = \frac{V^2}{Lg} \text{ ou } \frac{V}{\sqrt{Lg}}$$

— Número de Mach:

$$[NM] = \frac{\text{Forças de inércia}}{\text{Forças de compressibilidade}} = \frac{\rho L^2 V^2}{K L^2} = \frac{V^2}{K/\rho} \text{ ou } \frac{V}{\sqrt{K/\rho}}$$

— Número de Strouhal:

$$[NS] = \frac{\text{Velocidade de escoamento}}{\text{Velocidade transiente}} = \frac{V}{L/t} = \frac{V \cdot t}{L}$$

Nas expressões acima, sabe-se que:

$$\sqrt{Lg} \text{ ou melhor } \sqrt{gh}$$

constitui a chamada fórmula de Lagrange, que corresponde à velocidade de propagação, na superfície, de uma onda elementar pura, dita de gravidade, a pequena profundidade (h) e que:

$$C = \sqrt{\frac{K}{\rho}}$$

corresponde à velocidade de propagação, em um fluido, de uma onda elástica.

Com relação aos números em apreço, fazemos as seguintes observações:

3.3 — Número de Reynolds (NR)

A velocidade **V** do numerador é normalmente considerada como sendo a velocidade média do escoamento ou do móvel em estudo.

O valor linear **L** corresponde a uma dimensão característica do sistema em estudo, sendo normalmente o diâmetro, no caso de condutos de seção circular, ou então o raio hidráulico, no caso de outras formas de seção.

$\frac{\mu}{\rho}$ = é a viscosidade cinemática do fluido em escoamento.

Como o NR resulta de um balanceamento entre as forças de inércia e as forças viscosas atuantes no sistema que está sendo estudado, resulta disso ser esse o número típico para a fixação das condições de semelhança sob o ponto de vista dinâmico, nos estudos experimentais em modelos reduzidos, dos condutos forçados, em cujos escoamentos, sem superfície livre, predominam as referidas forças.

São clássicas e amplamente conhecidos os valores críticos inferior (2.000) e superior (4.000) do NR, com a ocorrência dos conhecidos fenômenos que os caracterizam nos escoamentos.

A igualdade dos NR no modelo e no protótipo, combinada com os recursos da análise dimensional e com as expressões clássicas da mecânica racional e da mecânica dos fluidos, permite o estabelecimento das diferentes escalas de semelhança entre grandezas desejadas, no estudo de dois sistemas geometricamente semelhantes.

Em capítulos posteriores voltaremos a abordar, em maiores detalhes, aspectos especiais de aplicação do critério acima.

3.4 — Número de Froude (NF)

A velocidade do numerador é considerada normalmente como sendo a velocidade média de escoamento do fluido ou de deslocamento do móvel.

Em linhas anteriores já apresentamos o significado da expressão \sqrt{gh} , constante do denominador. No estabelecimento de condições de semelhança segundo o NF, o valor de **h** deve corresponder a profundidades homólogas, características dos sistemas em estudo.

Como o NF estabelece um balanceamento entre as forças de inércia e as forças gravitacionais, atuantes no sistema considerado, resulta disso ser ele o número típico para a fixação das condições de semelhança sob o ponto de vista dinâmico, entre dois sistemas geometricamente semelhantes, onde essas forças têm ação predominante.

É o número típico e clássico para caracterização dos escoamentos ditos a superfícies livre, correspondendo especificamente aos condutos livres.

Tem para valor crítico a unidade, significando, no caso, a igualdade entre a velocidade considerada e a velocidade de propagação, na superfície livre, de uma onda elementar pura, solitária, a baixa profundidade.

Identicamente ao que dissemos com relação ao NR, a igualdade deste número, no modelo e no protótipo, combinada com os recursos da análise dimensional e com as expressões clássicas da mecânica racional e da mecânica dos fluidos, permite o estabelecimento e a dedução das diferentes escalas de semelhança entre as grandezas desejadas, no estudo de dois sistemas geometricamente semelhantes.

O NF ainda encontra importante campo de aplicações no domínio analógico, onde os seus valores típicos podem ser associados aos do outro número que a seguir abordaremos, o Número de Mach, para o estudo de condições de formação e de propagação de ondas elásticas e de ondas de choque.

3.5 — Número de Mach (NM)

A velocidade do numerador é considerada normalmente como sendo a velocidade de escoamento ou de aproximação de fluido, ou então a velocidade de deslocamento do móvel.

A grandeza do denominador já foi definida anteriormente e corresponde à velocidade de propagação de uma onda elástica, no meio considerado.

É o número típico característico dos escoamentos em que a compressibilidade do fluido tem de ser considerada.

Identicamente ao que foi dito com relação aos números anteriores, constitui o NM a base para o estabelecimento e a fixação das relações de semelhança entre modelo e protótipo, quando nos fenômenos estudados predominam forças elásticas.

A igualdade dos NM entre modelo e protótipo, combinada com os recursos da análise dimensional e com as equações clássicas da mecânica teórica e da mecânica dos fluidos, permite a dedução e a fixação das relações de semelhança sob o ponto de vista dinâmico entre os dois sistemas.

O valor crítico do NM é a unidade, ou seja, é o que corresponde à situação em que a velocidade considerada é igual à de propagação de uma onda elástica no meio estudado.

Quando nos referimos ao NF, tivemos a oportunidade de citar o relacionamento que se pode estabelecer entre o NM e aquele número, permitindo o emprego de relações analógicas de grande importância prática.

A analogia entre as condições críticas do NF = 1 e do NM = 1, permite obter conclusões e realizar observações de ordem prática de grande valor e de grande importância em estudos experimentais.

Outro aspecto que desejamos destacar com relação ao emprego do NM na técnica experimental, reside na caracterização dos limites de compressibilidade, dentro dos quais um determinado fluido, que está sendo empregado, ou estudado, poderá ser ou não considerado como praticamente compreensível ou incompreensível. Nesse aspecto a maioria dos autores indica o valor prático de 0,3, fixando o seguinte critério:

Incompressibilidade: $NM < 0.3$

Compressibilidade: $NM > 0.3$

Evidentemente a hipótese simplificadora da incompressibilidade facilita extraordinariamente a solução dos problemas práticos, como se sabe.

2.6 — Número de Strouhal (NS)

Modernamente vem sendo empregado outro número nos domínios da Mecânica dos Fluidos, cuja importância e cuja utilização vem crescendo a cada dia, dado o seu fundamental na caracterização dos fenômenos ligados a transientes hidráulicos, correspondendo portanto a regimes não permanentes de escoamento, onde ocorrem

consequentemente variações em função do tempo, cuja expressão é:

$$NS = \frac{Vt}{L}$$

onde:

V = velocidade de referência

t = intervalo de tempo, correspondente ao fenômeno em estudo

L = comprimento de referência.

Igualmente ao que foi dito com relação aos números anteriormente considerados, a igualdade do NS no modelo e no protótipo, serve de base para a fixação das condições de semelhança sob o ponto de vista dinâmico, entre dois sistemas (modelo e protótipo), nos quais ocorrem escoamentos em regime não permanente, onde portanto a variável tempo deve ser considerada.

O número em apreço corresponde a uma relação entre velocidades, ou seja, normalmente entre uma velocidade considerada representativa do escoamento em estudo e a velocidade, suposta constante, de variação do fenômeno, no intervalo de tempo t, admitido suficientemente pequeno, para que possa ser considerada a constância da ocorrência no seu processamento.

Note-se a analogia de escalas dinâmicas de semelhança que ocorre entre as escalas obtidas através deste número e os de Froude e Mach, que correspondem, também, as relações de velocidades, variando, evidentemente, as condições de interpretação.

O NS não é de formulação recente, pois que data de 1878, quando o autor o apresentou em trabalho de sua autoria. O seu emprego é que vem sendo ampliado nos últimos tempos.

4 — CRITÉRIOS ESPECIAIS DE SEMELHANÇA NO CASO DE TUBULAÇÕES

O estudo de tubulações em modelos reduzidos acarreta certas dificuldades na aplicação dos critérios de semelhança e obriga a adoção de certas aproximações, que iremos citar resumidamente nas linhas que se seguem.

Identicamente ao que acontece em qualquer estudo experimental, a escala geométrica a adotar deverá ser a maior possível, compatível como as instalações de que se dispõe para realizar o estudo. Valores entre 1/5 e 1/30 são recomendáveis.

Como decorrência da escala geométrica, surge o problema da rugosidade das paredes que, rigorosamente, também teria de ser reproduzida em

escala. Como isso se torna praticamente impossível, tal fato obriga o experimentador à adoção de critérios de aproximação e de hipóteses simplificadoras.

O estudo experimental de tubulações em modelo reduzido, sendo classicamente comandado pelas forças de inércia e pelas forças viscosas que predominam no escoamento, deve ser forçosamente regido por critérios de semelhança baseados no Número de Reynolds. A obediência rigorosa às escalas de semelhança, ditadas por esse número, todavia, se torna de difícil execução na prática, sendo, em certos casos, até mesmo impossível. Citemos como exemplo o caso da escala de velocidades, no qual, de acordo com o critério em apreço, a velocidade do modelo deverá ser n vezes maior do que a do protótipo, sendo n o denominador da escala geométrica.

Os estudos referentes a perdas de carga são normalmente feitos com base na clássica fórmula de Darcy-Weysbach, com o emprego do conhecido diagrama de Moody.

Os casos normais da prática, correspondem àqueles em que o escoamento no protótipo está situado no regime turbulento-rugoso e no qual, como se sabe, o valor do coeficiente f independe do NR, tornando-se as curvas do diagrama paralelas ao eixo das abscissas.

O estudo experimental obriga o modelo a trabalhar na mesma situação, para que haja compatibilidade de resultados e tal fato, normalmente, implica em sérias dificuldades de ordem prática, para obtenção da faixa adequada de trabalho do modelo.

Casos não muito comuns poderão ocorrer em que o protótipo tenha o seu escoamento situado no regime laminar ou na zona de transição.

Quando a situação ocorre no regime laminar, a compatibilidade de rugosidades não cria maiores problemas e os critérios de semelhança podem ser obtidos sem dificuldades.

Na zona de transição as coisas se complicam consideravelmente porque, como se sabe, no diagrama de Moody o fator f passa a variar sensivelmente em função do NR. Por falta de tempo para entrar em maiores considerações a respeito deste complexo caso, recomendamos todavia que a ocorrência de estudos dentro de tal zona, felizmente também indesejável no protótipo, seja evitada tanto quanto possível. Nos casos especiais em que isso se der, recomendamos consultar a farta documentação bibliográfica que estamos anexando a este trabalho.

Ali constando, ao nosso ver, o que de melhor existe publicado em livros sobre o assunto, certamente encontrarão farto material de orien-

tação e consulta, que seria impossível aqui incluir e discutir, pois teríamos que nos alongar demasiadamente.

Restando praticamente o regime turbulento rugoso, recomendamos que os estudos sejam realizados em valores do NR superiores a 10^6 . A partir daí, como se sabe, as forças viscosas deixam de ter ação sensível sobre o escoamento, que passa a ser comandado pelas forças de inércia.

Ora, situando modelo e protótipo dentro dessa faixa, pode-se então aplicar critérios de proporcionalidade entre os resultados obtidos, com base fundamentalmente em **relações adimensionais** que permitirão, **independentemente de escala**, transportar os resultados experimentais para o caso real.

Demonstra a teoria da semelhança que, em modelos dinamicamente semelhante, são iguais as relações adimensionais, obtidas através de grandezas correspondentes.

Dentro da faixa de trabalho adequada e com judiciosos critérios de aproximação e de simplificação, analisadas e dispostas as limitações impostas pelo NR, será possível então ao experimentador, não só empregar fluido diferente no modelo, como se faz comumente com o ar atmosférico, como também aplicar as escalas de semelhança com base no Número de Froude, que como se sabe, simplifica consideravelmente as relações.

Evidentemente, quanto ao emprego de tais critérios e aproximações, pesam aqui, em grande parte, os predicados especiais do experimentador, aos quais fizemos referência no início deste trabalho — tirocínio, visão, amadurecimento — tudo isso evidentemente, associado a um conhecimento amplo e detalhado dos aspectos teóricos do problema.

Casos existem em que se torna necessário descer aos detalhes da camada limite e quando tal ocorre, evidentemente, as coisas se complicam enormemente, sem todavia constituir obstáculo intransponível para o experimentador capaz e experiente.

Outro recurso importante, consiste na deformação de escalas geométricas, em que o conduto poderá ser **encurtado**, com a adoção de escala horizontal, de comprimento de tubulação, menor do que a vertical, com uma compensação através da rugosidade natural ou artificial do modelo ou por meio de **perdas de carga acidentais**, compensando **perdas de carga normais**, de acordo com o critério de comprimentos equivalentes ou comprimentos virtuais.

Ainda outro aspecto importante, de grande interesse prático, reside na determinação de per-

das de carga acidentais, ocorridos em condutos forçados. Para tais casos, especialmente quando se trata de dispositivos que não são de uso corrente na prática, e cujos coeficientes não são encontrados tabelados, fornece a experimentação em modelos recursos inestimáveis.

Trabalhando-se dentro de domínios adequados do NR, mesmo com o emprego de fluidos diferentes no modelo e no protótipo, e lançando-se mão da expressão normal das perdas acidentais, $h_a = K V^2/2g$, deduz-se o valor de K através da relação adimensional $h_a \frac{V^2}{2g}$, cujas vantagens de adoção já apresentamos anteriormente.

Assim, conjugando-se os resultados das medidas feitas com os recursos da estatística e da teoria dos erros, obtém-se, por intermédio do modelo reduzido, valores de K a serem adotados no protótipo, com toda a precisão exigida para a prática.

Os problemas relacionados com transientes hidráulicos, tal como ocorre com o clássico golpe de ariete, envolvendo a formação e a propagação de ondas elásticas, ligados evidentemente às características de reação elástica dos materiais empregados no modelo e no protótipo, também podem ser adequadamente estudados e resolvidos com emprego e apoio nos número de Mach e de Strouhal, senão sob o aspecto quantitativo, mas pelo menos com resultados qualitativos. Também os problemas relacionados com o transporte sólido, mesmo dentro de toda a complexidade e indefinição que envolvem até hoje o caso, podem, mesmo assim, ser estudados em modelos reduzidos de tubulações, com resultados plenamente satisfatórios.

Para terminar estas considerações de ordem geral que julgamos útil fazer, lembramos os ilimitados recursos que podem ser obtidos através dos estudos analógicos e da computação eletrônica.

Nos casos de estudos de redes de tubulações, as analogias elétricas associadas à computação constituem já processo consagrado, empregado correntemente, suficientemente analisado e descrito por muitos autores, normalmente associado ao clássico método de Hardy Cross. Para este assunto, igualmente, a bibliografia que estamos anexando fornece amplos recursos para estudo e obtenção de referências.

4 — O MODELO REDUZIDO

4.1 — Fases do Trabalho

Qualquer que seja o caso a estudar, neces-

sita o modelo ser cuidadosamente planejado em todos os seus aspectos, que a seguir relacionamos, na ordem em que deverão ser considerados:

1.º — Características gerais:

- a) Tipo de problema.
- b) Condições de semelhança a obedecer.
- c) Finalidades do estudo. Resultados a obter.
- d) Prazos a cumprir. Elaboração de cronograma.

2.º — Aspectos econômicos da execução. Elaboração de orçamento.

3.º — Projeto detalhado do modelo, abrangendo:

- a) Tipo.
- b) Escalas.
- c) Localização.
- d) Instalações e aparelhos.
- e) Material a empregar.

4.º — Construção do modelo.

5.º — Aferição ou taragem.

6.º — Exploração, obtenção de resultados.

7.º — Análise e interpretação dos resultados.

8.º — Elaboração de relatórios e documentação complementar, compreendendo:

- a) Relatórios parciais.
- b) Relatório final.
- c) Documentação suplementar (gráficos, quadros de valores, fotografia, cinematografia, etc.).
- d) Diário de operação e de exploração.

Evidentemente, cada um dos aspectos acima citados comportaria considerações detalhadas sobre a sua execução.

Não nos sendo possível entrar em maiores detalhes sobre esses assuntos, limitamo-nos à indicação esquemática do que deve ser feito, abordando a seguir apenas certos pontos que julgamos mais importantes.

4.2 — A Construção do Modelo

Da exatidão com que for executada a construção do modelo, muito depende a fidelidade dos resultados obtidos.

Todos os cuidados deverão ser tomados nesse sentido, mesmo quando são utilizados recursos improvisados, o que é muito comum em nosso meio.

Um aspecto importante a ressaltar, reside na utilização de diâmetros comerciais nos tubos a serem empregados, isso implicando em grande simplicidade e economia para o trabalho, muito embora, às vezes, com o sacrifício do denominador da escala geométrica, que pode até vir a se tornar fracionário, tendo apenas como consequência dificultar um pouco os cálculos.

Os materiais a empregar são os mais variados e as vezes, na escolha, somos forçados a empregar tubos existentes em depósito. Recentemente temos empregado comumente tubos de plástico ou então de cimento-amianto, pelas facilidades que esses materiais apresentam para o trabalho.

A tubulação transparente seria ideal porém, no nosso meio, isso se torna extremamente difícil e caro. Costumamos frequentemente usar tubos opacos e neles adaptar janelas transparentes de acrílico, nos trechos ou locais em que necessitamos fazer observações especiais.

A questão da rugosidade relativa do material empregado e a sua adaptação às condições do protótipo, é resolvida pelo critério de proporcionalidade baseado no NR, com aplicação do diagrama de Moody, ao qual nos referimos anteriormente.

Em modelos muito longos, temos enfrentado problemas de dilatação térmica por efeito de variação das temperaturas do dia. Fomos obrigados então a idealizar e realizar, até experimentalmente, juntas de dilatação especiais nos pontos críticos, pois a simples dilatação do acrílico, chegou a arrancar do chão sólidos pilares de alvenaria!

Em termos de experimentação todos os recursos são válidos, e a improvisação se faz presente a cada passo.

Tais ocorrências, muito frequentes em nosso meio, constituem o muito nosso «quebrar o galho» da linguagem popular.

As tomadas piezométricas devem ser executadas com o devido cuidado, seguindo-se as normas práticas comuns à execução desse dispositivo. A aparelhagem de medidas deverá ter a sua instalação devidamente prevista, de modo a que possa ser colocada em posição cômoda de leitura, livre de pancadas ou interferências, sem prejudicar o trabalho no modelo. De um bom projeto, de um bom estudo prévio do trabalho a executar, no qual devem ser analisados e previstos todos os problemas de ordem prática a enfrentar, muito depende o sucesso de um estudo experimental.

4.3 — A Aferição ou Taragem

Fase muito importante na execução de um estudo experimental, consiste na aferição ou taragem do modelo e na qual, depois deste construído, necessita o experimentador constatar a sua fidelidade ou seja, as possibilidades que terá o seu modelo de reproduzir, com a necessária precisão, os fenômenos ou as ocorrências que nele se processarão.

Essa finalidade é verificada sob dois aspectos.

- a) Construção.
- b) Funcionamento.

Quanto à construção, são verificadas todas as dimensões, todos os detalhes construtivos quanto à sua exatidão, em comparação com as plantas, com os projetos, que regeram a execução do modelo. Os detalhes de nivelamento, por exemplo, são cuidadosamente inspecionados por meio de pontos arbitrariamente escolhidos, cuja exatidão é verificada por meio de um nível de precisão, com visadas sobre mira. Do mesmo modo, são cuidadosamente inspecionados todos os demais aspectos construtivos, tais como instalações de aparelhos, condições de alimentação do fluido, de restituição a jusante, etc.

Algumas corridas iniciais do fluido a ser empregado são então realizadas, no intuito de ser verificado o comportamento inicial do modelo e das instalações auxiliares, sendo sanadas ou corrigidas as falhas constatadas ou então introduzidas as modificações julgadas necessárias.

Somente depois do modelo ser considerado em condições de funcionar adequadamente, é que têm prosseguimento as demais etapas do trabalho.

A taragem ou ajustagem é a fase de maior importância e de maior responsabilidade na execução de um estudo experimental sobre modelo reduzido, e que requer do experimentador perfeito conhecimento dos assuntos em jogo, grande tirocínio e plena capacidade de discernimento.

Consiste ela em fazer com que o modelo reproduza, com a necessária fidelidade, determinadas ocorrências calculadas ou observadas no protótipo. Isso poderá requerer horas, dias ou meses até, de um cuidadoso e metucioso trabalho de medidas, de observações e de estudos, durante a qual se trava entre o experimentador e o seu modelo um verdadeiro e íntimo conhecimento, através do qual o experimentador fica ciente das reações, das possibilidades, das limitações, das qualidades, das deficiências, da sua ferramenta de trabalho.

Não raro o modelo surpreende o experimenter, revelando ocorrências ou demonstrando reações até então despercebidas ou desconhecidas no sistema. Quando tem surgido dúvidas entre a experimentação e a teoria uma vez que uma não pode discordar da outra, na quase totalidade dos casos o modelo tem estado com a razão e temos sido obrigados a reformular ou a rever os aspectos teóricos ou as hipóteses admitidas, para adaptá-las à realidade da prática.

Terminada esta importante fase e considerando o modelo suficientemente fiel ou ajustado pelo experimentador, seguem-se os demais, mencionados anteriormente, comuns a qualquer trabalho experimental, a respeito das quais não podemos entrar em maiores detalhes.

Vale aqui reproduzir como norma geral da experimentação, o notável conceito emitido por Bacon, o grande filósofo e cientista inglês do Século XIII, pioneiro da experimentação: «Se as experiências não são guiadas pela teoria, são cegas; se a teoria não é apoiada pela prática, é enganosa».

Finalmente, neste aspecto geral, cumpre-nos salientar que, através do que resumidamente dissemos, fica esclarecido que o modelo reduzido não é maquete, como muita gente mal informada pensa à primeira vista. Enquanto que esta é uma obra realizada geralmente por um habilidoso ou um artista, normalmente com finalidades estéticas ou de demonstração, **Modelo Reduzido** é um instrumento de precisão e sensibilidade, projetado, construído, aferido e explorado por técnicos, por cientistas, por pesquisadores, com apoio técnico e científico profundo que, quando mal executado ou utilizado erradamente, não só se danifica, como também poderá conduzir a erros, a valores e resultados discordantes ou absurdos, tal como ocorreria com qualquer aparelhagem científica mal utilizada.

5 — CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esperamos haver dado cumprimento à honrosa tarefa que aqui nos trouxe, através das páginas que apresentamos. Difícil foi para nós realizar um resumo, prático e objetivo, sobre os aspectos que consideramos mais característicos e importantes, do estudo experimental de tubulações em modelos reduzidos.

Evidentemente, conforme ficou amplamente constatado pelo que expuzemos, o assunto comportaria amplo desenvolvimento, não só sob o aspecto teórico, como também sob o aspecto prático.

Conforme dissemos no início, tendo em vista as finalidades e o programa deste curso, no dilema entre a teoria e a prática, na impossibilidade de desenvolver as duas em maiores detalhes, preferimos mencionar apenas os aspectos gerais de ambas, voltando-nos com maior preocupação para a prática.

Poderíamos ter enchido as páginas com belas e complicadas deduções matemáticas, mas tivemos o receio de que assim fazendo, muito embora estivéssemos a altura dos conhecimentos de todos aqui presentes, estaríamos tornando o assunto menos interessante para as finalidades visadas.

Que nos compreendam e perdoem os mestres, os especialistas, aqui certamente presentes.

Todavia, para aqueles que tendo sido alertados para o profundo desenvolvimento que o assunto certamente comporta, desejarem enveredar pelos amplos domínios das deduções teóricas e do vasto e belo campo matemático em que ele se fundamenta, aí estão as referências bibliográficas, nas quais procuramos reunir o que, ao nosso ver, existe de clássico, de completo, antigo ou moderno, publicado em livros, para apoio e desenvolvimento profundo do que apenas citamos.

Fazemos votos, isto sim, para que, através das nossas linhas, todos aqui presentes, tenham ficado cientes e capacitados do formidável apoio que a experimentação, que o trabalho sobre modelos reduzidos, sem limitações práticas ou teóricas de qualquer espécie, poderá dar ao estudo, ao projeto, ao emprego de tubulações, em qualquer caso prático.

Para isso, julgamos, não será necessário apelar para amplos, desenvolvidos e custosos laboratórios, que infelizmente ainda não existem em nosso país, mas que certamente, graças à fase de formidável desenvolvimento e de progresso que estamos atravessando, certamente existirão dentro de pouco tempo.

Todavia, desde já, como ontem, hoje e sempre, aqui estão em nossa terra os engenheiros, os pesquisadores, os técnicos nacionais, com a sua capacidade, com o seu entusiasmo, com o seu patriotismo, e o que é mais importante, com a sua mundialmente conhecida e proclamada vivacidade de espírito e com a sua capacidade de improvisação, prontos para realizar, como sempre fizeram e farão, qualquer trabalho experimental de que a engenharia hidráulica nacional venha a necessitar, para a fabricação, para o estudo ou para o projeto das suas tubulações. Da nossa parte, dentro do nosso modesto campo de atividades, queremos que nestas linhas finais fique constatado plenamente esse desejo e esse espírito de

participação e de colaboração, sem interesses comerciais de qualquer espécie.

O Instituto Militar de Engenharia, órgão no qual temos o nosso Laboratório, estou certo, prestará essa colaboração sempre que ela for julgada útil ou necessária, onde quer que seja.

Desejamos finalmente expressar os nossos agradecimentos pela honra que nos foi concedida, de participar deste curso, aqui comparecendo perante tão distinta e seleta assistência, formulando votos para que outros cursos, outras reuniões, quaisquer que sejam elas, venham a se realizar, cada vez mais, no nosso país, entre aqueles que labutam nos domínios da hidráulica, quaisquer que sejam eles, como agora aqui fazemos. Nossos cumprimentos para a comissão organizadora deste curso, que realizou tão brilhante trabalho, dando com isso um exemplo às instituições congêneres, servindo de amostra e de estímulo para realizações idênticas.

Ao encerrar, solicitamos a todos os colegas, todos os técnicos, todos os especialistas aqui presentes, que unamos nossos esforços para que, identicamente ao que deve ocorrer em todos os demais setores especializados do país, o Brasil não pare ou seja atrasado por faltas ou deficiências em suas tubulações, que a nós cumpre projetar, produzir, instalar, experimentar ou explorar.

BIBLIOGRAFIA

1. FREEMAN, J. R. — «**Hydraulic Laboratory Practice**». American Society of Mechanical Engineers, U.S.A., 1929, p. 11 (esgotado).
2. ALLEN, J. — «**Scale Models in Hydraulic Engineering**». 1.^a Edição, Londres, Longmans, Green and Co., 1952, 415 p. Il.
3. A.S.C.E. — «**Hydraulic Models**». Manuals of Engineering Practice, n.º 25, 2.^a Edição, New York, U.S.A., 1959, 110 p., Il.
4. BUREAU OF RECLAMATION — «**Hydraulic Laboratory Practice**». Engineering Monograph n.º 18, Edição 1953, Denver, Colorado, U.S.A., 111 p., Il.
5. MURPHY, Gleen — «**Similitude in Engineering**». 1.^a Edição, 1950, The Ronald Press Company, New York, 302 p., Il.
6. SKOGLUND, Victor J. — «**Similitude — Theory and Applications**». 1.^a Edição, 1967, International Textbook Co., Pennsylvania, U.S.A., 320 p., Il.
7. WARNOCK, J. E. — «Hydraulic Similitude». In Rouse, H. — «**Engineering Hydraulics**», Capítulo II, John Wiley & Sons, New York, U.S.A., 1951, 1039 p., Il.
8. LANGHAAR, H. L. — «**Dimensional Analysis and Theory of Models**». John Wiley & Sons, New York, U.S.A., 1951.
9. HICKOX, G. H. — «Hydraulic Models» in Davis, C. V. — «**Handbook of Applied Hydraulics**», Capítulo 24, McGraw-Hill Book Co., 2.^a Edição, New York, U.S.A., 1952, Il.
10. HOLT, M. — «Dimensional Analysis» in Streeter, V. L. — «**Handbook of Fluid Dynamics**», McGraw-Hill Book Company, New York, U.S.A., 1961, Il.
11. SEDOV, L. I. — «**Similarity and Dimensional Methods in Mechanics**». Tradução inglesa de M. Holt, Academic Press Inc. New York, 1959, Il.
12. IPSEN, H. L. — «**Units, Dimensions and Dimensionless Numbers**». McGraw-Hill Book Company, New York, U.S.A., 1960.
13. BRIDGMAN, P. W. — «**Dimensional Analysis**». Yale University Press, New Haven, Connecticut, U.S.A., Paperback Y, 82, 1963.
14. DUNCAN, W. J. — «**Physical Similarity and Dimensional Analysis**». Edward Arnold and Co., Londres, Inglaterra, 1953, Il.
15. FREIER, George D. — «**University Physics**». Appleton, Century, Crofts, New York, U.S.A., 1965, 503 p., Il.
16. PURCELL, Edwin J. — «**Calculus with Analytic Geometry**». Appleton, Century, Crofts, New York, U.S.A., 1965, 843 p., Il.
17. LANDAU, L. D. and LIFSHITZ, E. M. — «**Fluid Mechanics**». Versão inglesa por Sykes, J. B. and Reid, W. H. — Pergamon Press, New York, U.S.A., 3.^a Edição, 1966, 536 p.
18. WALKER, Helen M. and LEV, Joseph — «**Elementary Statistical Methods**». 3.^a Edição, 1969, Holt, Rinehart and Winston, Inc., New York, U.S.A., 432 p., Il.
19. PANKHURST, R. C. — «**Dimensional Analysis and Scale Factors**». Chapman and Hall Ltd., Londres, Inglaterra 1964, Il.
20. SCHLICHTING, Herman — «**Boundary Layer Theory**». 6.^a Edição, 1968, McGraw-Hill Book Co., New York, U.S.A., 747 pp., Il.
21. LAMB, H. — «**Hydrodynamics**». Dover Publications, 1931.
22. MILNE-THOMSON, L. M. — «**Theoretical Hydrodynamics**». Mac Millan, Londres, Inglaterra, 1968.
23. KOCHIN, N. J.; KIBEL, I. A. and ROSE, N. IV — «**Theoretical Hydromechanics**». John Wiley & Sons, New York, U.S.A., 1965.
24. HINZE, J. O. — «**Turbulence**». McGraw-Hill Book Co., New York, U.S.A., 1959.