

PROJETO DE BANCADA EXPERIMENTAL PARA ANALISAR O ESCOAMENTO BIFÁSICO LÍQUIDO-GÁS EM UMA TUBULAÇÃO HORIZONTAL

ANDRADE, Carlos Alberto Coelho de (IC²-Engenharia Mecânica-Unibrasil)

MUREN, Maurício (IC²-Engenharia Mecânica-Unibrasil)

SCHNEIDER, Fábio Alencar (Orientador-Engenharia Mecânica-Unibrasil)

VICENCIO, Fernando Castillo (Orientador-Engenharia Mecânica-Unibrasil)

Escoamentos multifásicos acontecem com grande frequência tanto na natureza como em aplicações industriais e ocorrem em diversos padrões geométricos sendo mais comumente utilizados no transporte de misturas em tubulações e encontrados com maior frequência nas indústrias de petróleo e gás natural. De acordo com as vazões das fases líquida e gasosa presentes, nestas tubulações o escoamento pode adquirir diversas configurações, denominados padrões de escoamento, que dependem principalmente das velocidades e pressões do gás e do líquido, assim como dos fenômenos interfaciais entre as fases. Neste trabalho, foi realizado um estudo experimental do escoamento bifásico de água e ar em uma tubulação horizontal, para verificar a queda de pressão para diferentes condições de vazão volumétrica na entrada. Inicialmente, foi estudado o padrão em golfadas, que é caracterizado pela passagem intermitente de bolhas alongadas de gás seguidas por pistões de líquido, o qual é um dos padrões mais frequentes na extração de petróleo. Para alcançar este objetivo, foi projetado um misturador e uma bancada experimental no GPEM-UNIBRASIL, com a finalidade de analisar e avaliar os principais parâmetros de escoamento líquido-gás em golfadas sob diferentes condições de vazões volumétricas.

Palavras-chave: *Escoamento bifásico; Misturador água-ar; Bancada Experimental; Escoamento em Golfadas; Tubulação Horizontal.*

Sendo caracterizado pelo escoamento de um pistão de líquido com grande quantidade de movimento seguido por uma bolha de gás compressível, os escoamentos multifásicos são mais utilizados em processos industriais envolvendo ebulição de líquidos e condensação de vapores, aplicado em refinarias de petróleo, sistemas de refrigeração, processos químicos e energia nuclear. Tratando-se do petróleo, o escoamento multifásico é encontrado na coluna de produção dos poços e nos dutos de produção, onde é transportado a longas distâncias gás, fases sólidas e líquidas. A determinação e estudo das vazões de entrada destes elementos é um dos pontos chave para a realização das atividades destas indústrias, devido a que essas vazões determinam o padrão de escoamento que ocorre num determinado local da tubulação de extração ou transporte. O escoamento bifásico líquido-gás, onde somente estão presentes duas fases, é o mais comum a ser estudado, aonde de acordo com a variação das vazões das fases líquida e gasosa, o escoamento pode adquirir diversas configurações geométricas, denominados padrões de escoamento.

No presente trabalho, foram realizados experimentos para verificar os valores de queda de pressão em tubulações quando comparada com os valores obtidos do

Diagrama de Moody. Para atingir os objetivos deste trabalho, fora utilizada a bancada experimental do Grupo de Pesquisa em Engenharia Mecânica (GPEM) da UNIBRASIL. A bancada, cuja seção de teste é mostrada na Figura (2), consta de uma tubulação de acrílico com 1" de diâmetro interno e uma linha de teste de 8,075m comprimento. Além disso, a bancada consta de uma bomba centrífuga, rotâmetros para medir a vazão de gás e líquido, assim como manômetros para realizar a medição de pressão do escoamento.



Figura 1: Manômetros utilizados nos experimentos.

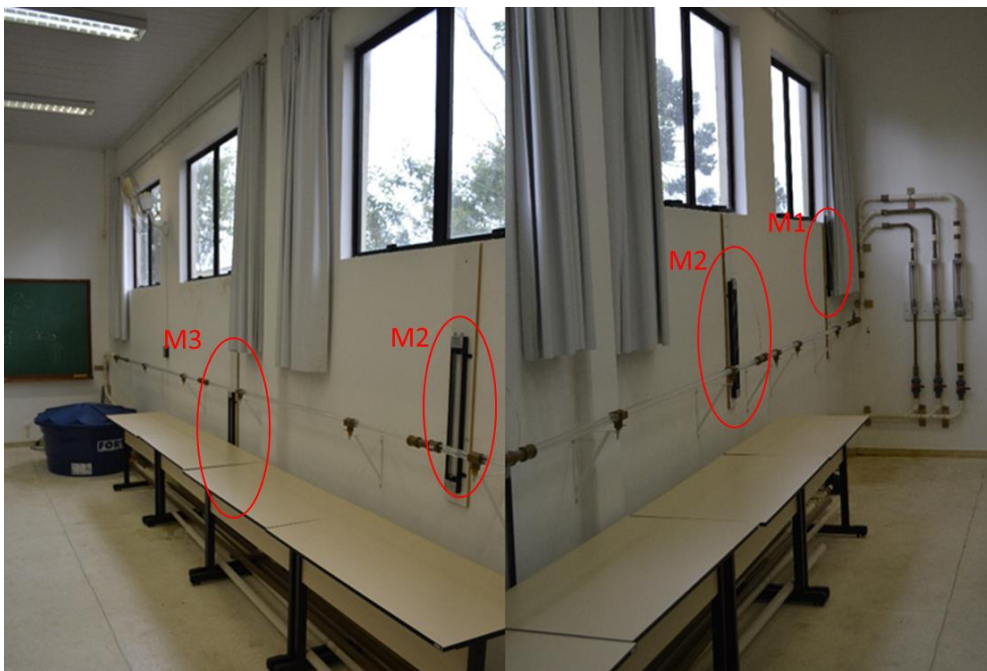


Figura 2: Bancada experimental e seções de medição da pressão.

A queda de pressão foi medida tendo como referência três locais de medição, as quais estão a 0,25 m; 2,83m e 5,34m de distância do início da linha bifásica horizontal, as quais estão indicadas como M1, M2 e M3 na “Figura 2”, respectivamente. Essas medições de queda de pressão foram realizadas entre diferentes vazões volumétricas (Q), as quais foram medidas com os rotâmetros e na faixa mostrada na “Tabela 1”.

Ao ser realizado o estudo e análise do escoamento bifásico, observa-se que vários padrões de escoamento podem ocorrer, alguns dos quais são mostrados na “Figuras 3 e 4”, diferindo um do outro pela distribuição espacial das fases, a qual é influenciada pelas vazões de líquido e gás; propriedades dos fluídos (massa específica, viscosidade e tensão superficial); condições de operação (pressão, temperatura, gravidade e outros.); e características geométricas do duto (forma, diâmetro e inclinação), os quais tornam complexo este fenômeno.

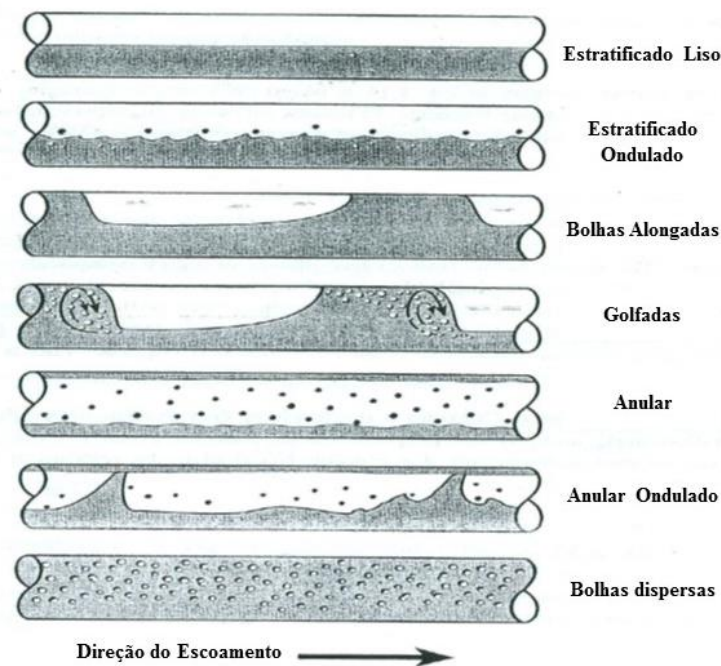


Figura 3: Padrões de Escoamento ar/água em tubulações horizontais (SHOHAM, 2006)

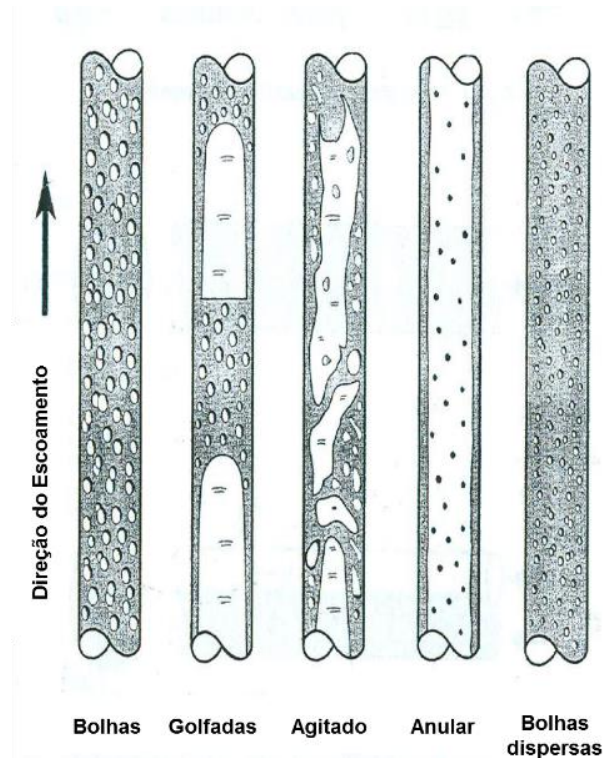


Figura 4: Padrões de Escoamento ar/água em tubulações verticais (SHOHAM, 2006)

Com relação a pressão, pode ser definida como uma força normal exercida por um fluido por unidade de Área (ÇENGEL, 2006). A pressão real numa posição dada é chamada de pressão absoluta, sendo medida em relação ao vácuo absoluto, aonde a pressão absoluta é igual a zero. A maioria dos dispositivos de medição de pressão, no entanto, são calibrados utilizando a pressão atmosférica como referência, indicando a diferença entre a pressão absoluta e a pressão atmosférica local. Esta diferença é chamada de pressão manométrica. As pressões abaixo da pressão atmosférica são chamadas de pressões de vácuo e são medidas por manômetros de vácuo. Cabe ressaltar que pressões absolutas, manométricas, e de vácuo são todas positivas e possuem relações umas com as outras, como demonstrado em (1), (2) e “Figuras 5”.

$$P_{man} = P_{abs} - P_{atm} \quad (1)$$

$$P_{vac} = P_{atm} - P_{abs} \quad (2)$$

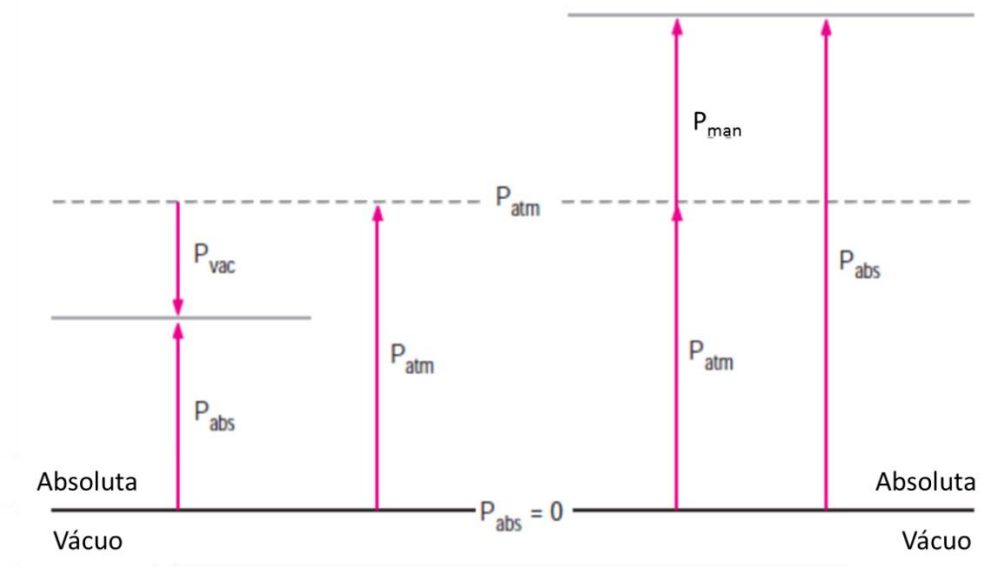


Figura 5: Pressões absolutas, manométrica e do vácuo (Fonte: ÇENGEL, 2006)

Ao relacionar o fator de atrito de Darcy-Weisbach (3) com o número de Reynolds (4) e com a rugosidade relativa se é obtido o gráfico proposto por Lewis Ferry Moody, mostrado na “Figura 6”. O diagrama de Moody é amplamente utilizado para determinar o fator de atrito em tubulações, baseado nas perdas de cargas, no comportamento do escoamento (laminar ou turbulento) e a rugosidade da tubulação pela qual escoar o fluido. Assim, a perda de carga numa tubulação (h_f) pode ser calculada pela equação

$$h_f = f \frac{L V^2}{D 2g} \quad (3)$$

onde f é o fator de atrito, L é o comprimento da tubulação V é a velocidade média do escoamento, D é o diâmetro interno da tubulação, e g é a aceleração da gravidade.

O regime do escoamento, seja laminar ou turbulento, está determinado pelo número de Reynolds, definido pela equação

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (4)$$

onde Re é o número de Reynolds, ρ é a massa específica da água, V é a velocidade do líquido, D é o diâmetro do tubo e μ é a viscosidade dinâmica da água.

Outro parâmetro a utilizar no cálculo do fator de atrito no diagrama de Moody é a rugosidade relativa, e/D , a qual depende do material e do processo de fabricação da tubulação, e cuja medição é geralmente feita com rugosímetros.

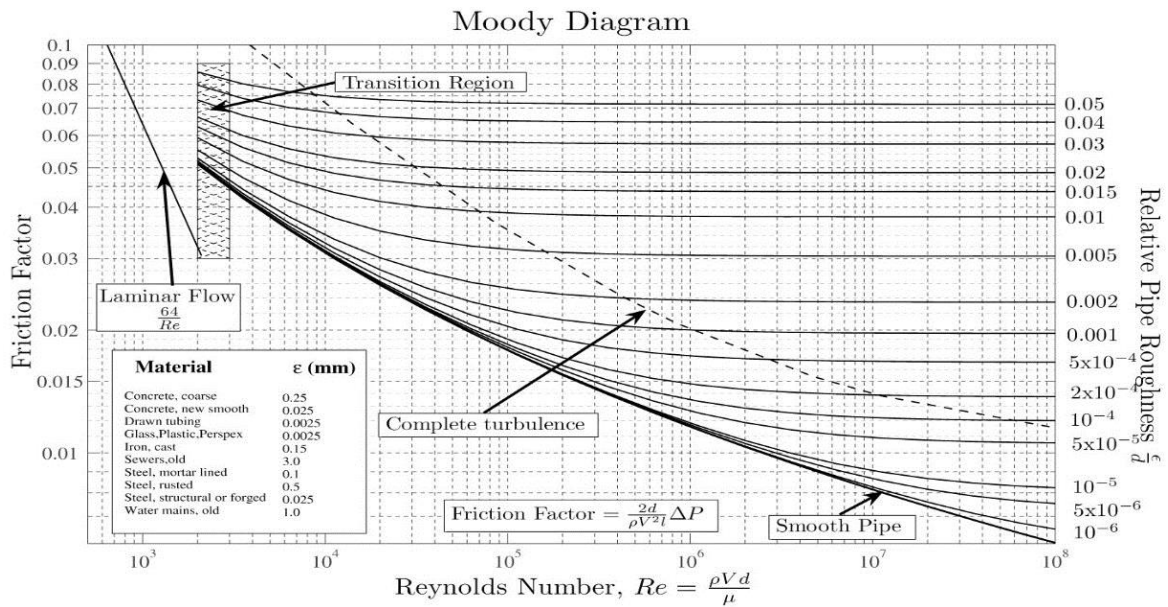


Figura 6: Diagrama de Moody (Fonte: FOX *et al.*, 2010)

As pressões nas três seções de medição indicadas na “Figura 2”, foram medidas para cada uma das vazões volumétricas indicadas na “Tabela 1”. Com os dados das vazões de entrada foi realizado o cálculo do número de Reynolds, assim como o da rugosidade relativa e o fator de atrito, comparando-os com os valores tabelados presentes no diagrama de Moody.

Após realizar a medição da altura marcada pelos manômetros para cada vazão empregada, foi realizado o cálculo para determinar a pressão real que estava sendo submetido o escoamento nos 3 pontos da bancada referentes às posições em que os manômetros estavam instalados, como mostrado na “Tabela 1”.

Tabela 1: Dados de vazão e pressão manométrica obtidos nos experimentos.

Rotâmetro	Q (m³/s)	h1 (m)	Pressão h1 (Pa)	h2 (m)	Pressão h2 (Pa)	h3 (m)	Pressão h3 (Pa)
3	0,0008	0,903	8858,43	0,3705	3634,605	-0,3035	-2977,335
3	0,000783	0,796	7808,76	0,2825	2771,325	-0,3465	-3399,165
3	0,00075	0,672	6592,32	0,3705	3634,605	-0,4185	-4105,485
3	0,000713	0,7	6867	0,0185	181,485	-0,4885	-4792,185
3	0,000687	0,49	4806,9	-0,0135	-132,435	0,1025	1005,525
3	0,000665	0,408	4002,48	0,0265	259,965	0,0865	848,565
3	0,000646	0,3	2943	0,0665	652,365	0,0265	259,965
3	0,000597	0,056	549,36	-0,0695	-681,795	-0,0195	-191,295

Com esses dados, foi calculado o fator de atrito experimental, que determina a perda de carga no decorrer do escoamento, comparando-o com os valores tabelados. Para verificar esses valores, foi utilizado o diagrama de Moody, baseado nas medidas de rugosidade relativa e número de Reynolds. Os valores para o cálculo do fator de atrito para cada condição de vazão são mostrados na “Tabela 1”.

Tabela 2: Parâmetros para a obtenção do fator de atrito experimental.

Q (m³/s)	Hf-Hi (m)	L (m)	Vel. Lq. (m/s)	f exp.	Re	Rugo. Relat.
0,0008	0,5325	2,514	1,578820193	0,042346909	45058,46394	0,001771654
0,00078	0,5135	2,514	1,545270264	0,042628397	44100,97158	0,001771654
0,00075	0,3015	2,514	1,480143931	0,027280157	42242,30994	0,001771654
0,00071	0,6815	2,514	1,407123497	0,06822898	40158,35598	0,001771654
0,00069	0,5035	2,514	1,355811841	0,05429603	38693,95591	0,001771654
0,00067	0,3815	2,514	1,312394286	0,043906956	37454,84815	0,001771654
0,00065	0,2335	2,514	1,274897306	0,028477635	36384,70963	0,001771654
0,0006	0,1255	2,514	1,178194569	0,017921615	33624,87871	0,001771654
0,0008	0,674	2,58	1,578820193	0,052228501	45058,46394	0,001771654
0,00078	0,629	2,58	1,545270264	0,050880898	44100,97158	0,001771654
0,00075	0,789	2,58	1,480143931	0,069563611	42242,30994	0,001771654
0,00071	0,507	2,58	1,407123497	0,049460277	40158,35598	0,001771654
0,00069	-0,116	2,58	1,355811841	-0,012189115	38693,95591	0,001771654
0,00067	-0,06	2,58	1,312394286	-0,006728769	37454,84815	0,001771654
0,00065	0,04	2,58	1,274897306	0,0047536	36384,70963	0,001771654
0,0006	-0,05	2,58	1,178194569	-0,006957432	33624,87871	0,001771654
0,0008	1,2065	5,094	1,578820193	0,04735172	45058,46394	0,001771654
0,00078	1,1425	5,094	1,545270264	0,046808109	44100,97158	0,001771654
0,00075	1,0905	5,094	1,480143931	0,048695805	42242,30994	0,001771654
0,00071	1,1885	5,094	1,407123497	0,058723041	40158,35598	0,001771654
0,00069	0,3875	5,094	1,355811841	0,020622753	38693,95591	0,001771654
0,00067	0,3215	5,094	1,312394286	0,018261065	37454,84815	0,001771654
0,00065	0,2735	5,094	1,274897306	0,016461928	36384,70963	0,001771654
0,0006	0,0755	5,094	1,178194569	0,00532092	33624,87871	0,001771654

Como observado na coluna da “Tabela 2” correspondente ao número de Reynolds (Re), observa-se que o escoamento em todos os experimentos realizados é

turbulento. Com base nesses dados, os valores medidos e os valores calculados foram comparados, como mostrado na “Figura 7”.

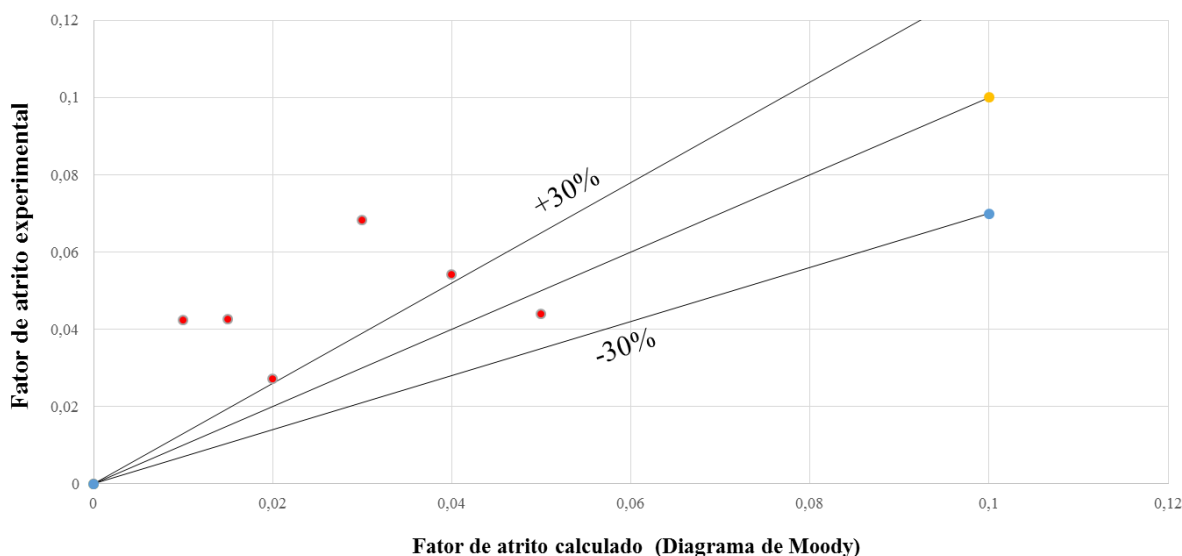


Figura 7: Fator de atrito calculado e fator de atrito experimental

Na Figura 7, foram confrontados os dados calculados e experimentais do fator de atrito em cada um dos experimentos realizados, com relação a uma faixa de variação do $\pm 30\%$. Observa-se que os pontos vermelhos não são coincidentes com os valores calculados do diagrama de Moody e, inclusive, a maior parte delas está fora da região do 30% determinada como referência. Essa divergência entre os valores pode ser causada pelo número de medições realizado, sendo que para verificar um experimento é necessário realizar várias medições, assim como uma otimização da bancada experimental e da metodologia de realização do experimento que possam interferir nas medições. Conclui-se que, para evitar estes problemas, devem ser realizados experimentos de verificação dos valores obtidos neste trabalho.

FALCONE, Gioia; HEWITT, Geoffrey F.; ALIMONTI, Claudio. **Multiphase Flow Metering: Principles and Applications**. Amsterdam: Elsevier, 2009.

SHOHAM, Ovadia. **Mechanistic Modeling of Gas-liquid Two-phase Flow in Pipes**. United States: Society Of Petroleum Engineers, 2006.

FOX, Robert W.; PRITCHARD, Phillip J.; MCDONALD, Alan T. **Introdução a Mecânica dos Fluidos**. 7. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2010.