

AVALIAÇÃO DO COEFICIENTE DE ATRITO EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE GÁS NATURAL CANALIZADO

Julio César de Almeida (1); Vagner Silvério (2)

(1) *Universidade Federal do Paraná* – j.cezar@ufpr.br

(2) *Universidade Federal do Paraná* – vagner.silverio@ufpr.br

Resumo: Apresenta-se neste trabalho uma proposta para a determinação do coeficiente de atrito em escoamentos unidimensionais, compressíveis e transitórios em redes de distribuição de gás natural. No projeto de uma rede de distribuição de gás natural, diversas propriedades associadas ao fluido de trabalho devem ser identificadas e avaliadas, visando à obtenção de um modelo matemático de resolução simplificada e que melhor se adapte as condições reais e operacionais do sistema. Nesse contexto, a identificação do coeficiente de atrito poderá vir a ocasionar dificuldades matemáticas complementares quando da solução da equação do *momentum* correspondente. A determinação experimental do coeficiente de atrito nem sempre se encontra disponível, além de ser uma metodologia relativamente cara e demorada. Dessa forma, uma proposta que permita ao projetista simular situações operacionais, objetivando avaliar e validar o equacionamento matemático que melhor se adapte às condições reais de funcionamento do sistema pode vir a ser uma excelente alternativa no momento das avaliações de projeto iniciais.

Palavras-chave: gás natural, coeficiente de atrito, redes de distribuição de gás natural.

1. Introdução

Na maioria dos países, os sistemas de transporte e distribuição de gás natural consistem num elevado número de redes de tubulações totalmente integradas e que operam numa vasta gama de pressões. O desenvolvimento e aplicação do gás natural nos mais variados segmentos têm contribuído para a evolução dos sistemas de transporte e de distribuição correspondentes, para as quais se necessita de um fornecimento adequado do gás aos consumidores finais envolvidos, contemplando baixos custos de operação e manutenção. Na etapa do projeto, a simulação computacional contribuiu não apenas para a estrutura da rede, mas também para o futuro controle de vazões e pressões em pontos específicos e pré-determinados. Os modelos matemáticos de fluidos e fluxos de gás ao longo de tubulações são baseados em princípios fundamentais da física (mecânica e termodinâmica) do contínuo, recaindo-se nos princípios da conservação da massa, *momentum* e energia, além de uma equação de estado correspondente (Almeida, [1]). A equação da quantidade de movimento (*momentum*) apresenta, no termo relativo à força de atrito, o coeficiente de atrito ou fator de fricção. Tal coeficiente pode ser obtido experimentalmente gerando expressões explícitas e semi-empíricas que são ajustadas a um determinado valor de rugosidade

relativa dos dutos, ou ainda, ser obtido mediante a aplicação de equações tradicionais disponíveis na literatura (Abdolahi, [2]).

No presente artigo apresenta-se uma proposta de formulação matemática para o coeficiente de atrito em projetos de redes de distribuição de gás natural, efetivando-se uma validação final a partir de dados de campo das redes de distribuição de gás natural da COMPAGAS, empresa localizada no Estado do Paraná - sul do Brasil, a qual contempla na atualidade uma malha de distribuição aproximada de 850 km e que opera em faixas de pressão de 4, 7, 17 e 35 bar.

2. Desenvolvimento do modelo

Os modelos matemáticos de fluidos e fluxos de gás ao longo de tubulações são baseados em princípios fundamentais da física (mecânica e termodinâmica) do contínuo, recaindo-se nos princípios da conservação da massa, *momentum* e energia, além de uma equação de estado correspondente. O transporte de gás natural ao longo de uma tubulação pode, assim, ser avaliado da seguinte forma (Lurie, [3]): escoamento compressível e transitório; fluxo contínuo; fluxo unidimensional; tubulação indeformável e interação entre o fluido e tubulação, devido a problemas de vibração, insignificante.

A equação do *momentum* corresponde, na prática, a uma aplicação da segunda Lei do movimento de *Newton* a um elemento fluido. Tomando por referência um volume de controle diferencial do duto em análise pode-se demonstrar:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial x} + |v| \frac{2f v}{D} = 0 \quad (1)$$

Na expressão anterior, t é o tempo; p é a pressão do fluido; ρ é a massa específica do fluido; v é velocidade média de fluxo; D é o diâmetro interno do duto; e f é o coeficiente de atrito de *Darcy*.

O coeficiente de atrito é tipicamente estimado a partir do diagrama de *Moody* (Moody, [4]), o qual contempla regiões específicas de avaliação e considera dois fatores adimensionais distintos: o número de *Reynolds* (Re) e a rugosidade relativa do duto (ϵ/D). Entenda-se por rugosidade relativa, a razão entre os tamanhos das protuberâncias das rugosidades nas paredes dos tubos e o seu diâmetro interno.

O número de *Reynolds* tem por objetivo principal caracterizar o tipo de escoamento correspondente a uma determinada situação operacional, quando certo fluido escoar ao longo de uma tubulação. O referido parâmetro corresponde, na realidade, a uma relação entre as forças de inércia e as forças viscosas do fluido, sendo ainda dependente de propriedades do próprio fluido como a densidade e viscosidade dinâmica, bem como, de propriedades específicas de operação – como velocidade média do fluxo e diâmetro interno da tubulação. Matematicamente (μ é a viscosidade dinâmica do fluido (Pa.s)):

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (2)$$

Conceitualmente, considera-se que números de *Reynolds* inferiores a 2000-2300 correspondem a regimes de escoamento caracterizados como laminares, ou seja, fluxos com predominância de forças viscosas, enquanto que números de *Reynolds* superiores a 4000 correspondem a regimes de escoamento caracterizados como turbulentos, ou seja, fluxos com predominância de forças de inércia. Fluxos com número de *Reynolds* intermediários – entre 2300 e 4000 – correspondem, evidentemente, à condição de transição entre esses dois regimes principais.

3. Escoamentos parcialmente turbulentos e inteiramente turbulentos

Situações práticas de escoamentos de gás natural em dutos, que recaiam fora da condição de escoamentos laminares, são classificadas como escoamentos turbulentos ($Re > 4000$) e podem ainda serem subdivididas em duas situações de fluxos distintas: a) escoamentos parcialmente turbulentos (ou escoamentos em tubos hidraulicamente lisos) e b) escoamentos inteiramente turbulentos (ou escoamentos em tubos rugosos). Para o primeiro caso, a espessura da subcamada laminar é superior à rugosidade absoluta da parede do tubo, cobrindo assim a superfície interior do duto e ocasionando uma condição de perda de carga independente da rugosidade interna (Coelho, [6]). Das alternativas disponíveis na literatura para a determinação do coeficiente de atrito, propõem-se para o presente trabalho a equação semi-empírica de *Prandtl-von Kármán*:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left(\frac{2,825}{Re \sqrt{f}} \right) \quad (3)$$

Com o aumento do número de Reynolds (escoamentos em tubos rugosos) ocorre a diminuição da subcamada laminar, ocasionando uma transição no regime de escoamento e, conseqüentemente, a

passagem para o regime totalmente turbulento. Nessa situação, o coeficiente de atrito passa a ser totalmente dependente da rugosidade absoluta da tubulação e independente do número de *Reynolds*. Nessas circunstâncias, a equação de *Nikurase* corresponde a uma boa alternativa para a referida situação.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left(\frac{\varepsilon/D}{3,7} \right) \quad (4)$$

A rugosidade absoluta do tubo, presente nessas equações, não é de fácil medição ou mensuração em decorrência da sua variação com o tipo de fluido e com o próprio tempo de utilização da tubulação. Isso significa afirmar que a rugosidade dos tubos pode ser alterada por problemas operacionais de erosão ou corrosão, como também por precipitação de impurezas que possam vir a aderir à parede do duto. Os valores absolutos de rugosidade, normalmente medidos e utilizados em termos práticos, correspondem assim à condição de tubos comerciais novos e sem revestimento, sendo que para o caso de tubulações de aço carbono e PEAD, comumente utilizadas em redes de distribuição de gás natural, Coelho [6] propõem os valores de 0,0191 mm e 0,007 mm, respectivamente.

4. O número de *Reynolds* crítico

O número de *Reynolds* crítico corresponde a um valor numérico no qual se dá a mudança abrupta entre os regimes de escoamento parcialmente turbulento para totalmente turbulento. Segundo Coelho[6] é possível traçar uma curva, em escala “log-log”, que delimita as áreas de existência entre esses dois tipos de regimes, conforme ilustra esquematicamente a Figura 1 e cuja expressão matemática correspondente pode ser aproximada por:

$$Re_{crit} = 35,525 \left(\frac{\varepsilon}{D} \right)^{-1,1039} \quad (5)$$

A região inferior à referida curva corresponde a uma combinação de valores que caracterizam o regime de escoamento parcialmente turbulento, enquanto que a região superior à curva, ao regime de escoamento totalmente turbulento. Observar que a passagem de um regime de escoamento para o outro ocorre de forma abrupta, não havendo assim uma região de transição bem definida. Face ao exposto, alguns autores recomendam a utilização da equação de *Colebrook-White* (Colebrook, [8]) para situações nas quais se tenha uma proximidade com a curva correspondente a essa mudança abrupta. Assim:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left(\frac{\varepsilon/D}{3,7} + \frac{2,825}{\text{Re} \sqrt{f}} \right)$$

(6)

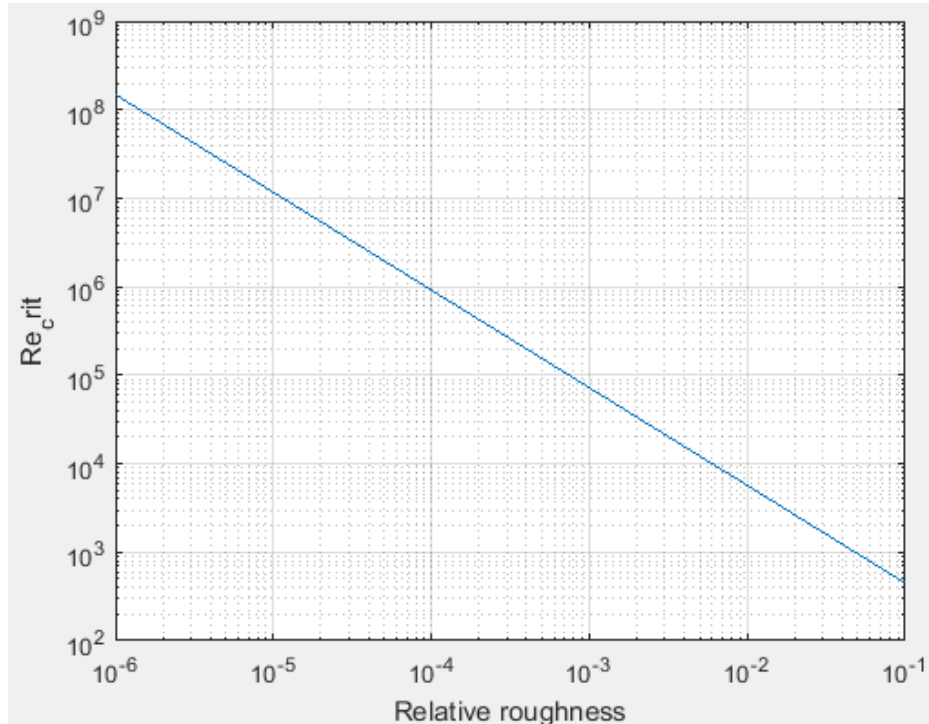


Figura 1. Rugosidade relativa x número de *Reynolds* crítico

Resumidamente, pode-se então considerar:

- $\text{Re} < \text{Re}_{\text{crit}}$ – utilização da equação de *Prantl-von Kármán*;
- $\text{Re} \approx \text{Re}_{\text{crit}}$ – utilização da equação de *Colebrook-White*; e
- $\text{Re} > \text{Re}_{\text{crit}}$ – utilização da equação de *Nikurase*.

5. Parâmetros operacionais da rede de distribuição da COMPAGAS

A COMPAGAS é a empresa responsável pelo fornecimento de gás natural por meio de tubulações aos segmentos industrial, automotivo, comercial e residencial no Estado do Paraná, sul do Brasil. A rede de distribuição da COMPAGAS tem, na atualidade, cerca de 850 km de extensão e apresenta trechos que transportam o gás nas pressões nominais relativas de 4, 7, 17 e 35 bar. O gás distribuído é proveniente de algumas poucas jazidas da Bolívia, o que confere tal estabilidade à composição

química média do gás ao ponto desta ter sido especificada em contrato comercial, cujos valores médios foram considerados nos cálculos correspondentes à massa molar do gás.

Para caracterizar as condições de operação da rede COMPAGAS, foram considerados valores de pressão, temperatura e fator de compressibilidade, os quais foram obtidos a partir de medições rotineiras realizadas nos equipamentos de redução de pressão espalhados ao longo da rede. Seis pontos de medição (identificados por letras maiúsculas na Tabela 1), escolhidos de forma aleatória, foram assim selecionados de forma a abranger tanto os quatro níveis de pressão nominal, como todas as regiões geográficas em que a rede está localizada. Além disso, as medições foram feitas ao longo de um período aproximado de 8 meses, incluindo assim meses de verão e inverno, contemplando dessa forma os extremos da faixa de temperaturas em que a rede tipicamente opera (entre 275 e 320 K).

Os parâmetros massa específica e viscosidade dinâmica, segundo a API-PROJECT 65 (1965), necessários para o cálculo dos números de *Reynolds* correspondentes foram obtidas a partir de expressões matemáticas consagradas e descritas na seqüência.

$$\rho = \frac{pM}{ZR_oT} \quad \mu = 10^{-7} \left(\frac{(10,425 + 0,244d)T^{1,5}}{68,02 + 208,4d + T} \right) e^{X\rho Y} \quad (7)$$

$$X = 2,576 + \frac{1063,58}{T} + 0,276d \quad Y = 1,108 + 0,0404X \quad (8)$$

Nas expressões anteriores, p é a pressão do gás (Pa); Z é o fator de compressibilidade do gás; M é a massa molar do gás (kg.kmol⁻¹); R_o é a constante universal dos gases (8314 J.kmol⁻¹K⁻¹); T é a temperatura de fluxo (K); d é a densidade do gás (d = M/M_{AR}); X, Y são coeficientes de cálculo; ρ é a massa específica do gás (g/cm³). Os resultados obtidos e calculados encontram-se tabulados na seqüência, conforme Tabela 1.

6. Coeficientes de atrito da rede de distribuição de gás natural da COMPAGAS

Os números de Reynolds calculados a partir dos dados operacionais levantados de forma aleatória demonstram uma forte tendência para a condição de regimes de fluxo turbulentos na totalidade dos casos das redes de distribuição de gás natural. Dentro do regime turbulento, existe ainda uma forte tendência para o caso de regimes parcialmente turbulentos prevalecendo com isso à equação de *Prantl-von Kármán* quanto à determinação dos coeficientes de atrito correspondentes (nesse caso,

exceto apenas para os pontos C e F). A tabela 2 traduz os valores calculados para os coeficientes de atrito em relação aos pontos de medição.

Tabela 1 – Parâmetros operacionais e resultados – redes de distribuição da COMPAGAS.

PT = parcialmente turbulento

TT = totalmente turbulento

AC = aço carbono

Parâmetros	A	B	C	D	E	F
p (bar)	3.953	3.1996	6.483	6.758	16.081	22.57
T (K)	283.65	295.65	290.65	281.15	285.15	278.15
Z	0.9897	0.9928	0.9846	0.9818	0.9591	0.9372
D (mm)	51.4	90	158.67	52.53	158.67	260.35
v (m/s)	4.636	14.51	9.614	3.523	1.717	3.224
material	PEAD	PEAD	AC	AC	AC	AC
(ϵ/D)	0.000136	0.000078	0.00012	0.000364	0.00012	0.000074
ρ (g/cm ³)	3.112	2.409	5.007	5.411	12.995	19.135
μ (Pa.s)x 10 ⁻⁵	1.074	1.107	1.116	1.087	1.1776	1.219
Re	69059	284092	684515	92081	300646	1317596
Re _{crit}	657753	1220727	753750	222464	753750	1302073
regime	PT	PT	PT	PT	PT	TT

Tabela 2 – Equações e resultados dos coeficientes de atrito – redes da COMPAGAS.

Parâmetros	A	B	C	D	E	F
equação	<i>PVK</i>	<i>PVK</i>	<i>CW</i>	<i>PVK</i>	<i>PVK</i>	<i>NIK</i>
f	0.0046	0.0033	0.0023	0.0043	0.0033	0.0021

PVK = Prantl-von Kármán

CW = Colebrook-White

NIK = Nikurase

7. Conclusões

Métodos convencionais para prever o coeficiente de atrito em tubulações de gás natural foram revistos e comparados, identificando faixas pré-definidas para a escolha do método de cálculo a ser

(83) 3322.3222

contato@conepetro.com.br

www.conepetro.com.br

considerado numa determinada situação operacional real ou até mesmo a partir de dados iniciais estimados para fins de simulação. Observou-se que, dentro das condições nominais de funcionamento de uma malha de distribuição de gás natural em aço carbono ou PEAD, ocorre à predominância do regime de escoamento turbulento, ou de forma mais específica: do regime de escoamento parcialmente turbulento, favorecendo com isso a utilização das equações de *Prantl-von Kármán* ou *Colebrook-White*.

Com o objetivo de facilitar as avaliações efetivadas como também os cálculos realizados, optou-se por desenvolver uma rotina computacional em *Matlab*. Tal proposta permite ao usuário final, a partir de dados simplificados de entrada, obter respostas acerca do tipo de regime predominante, como também, da equação de cálculo a ser considerada. Nessa rotina, mediante o uso da função “*fzero*” torna-se também possível, após uma série de aproximações de convergência, obter-se o valor final para o coeficiente de atrito desejado, tornando assim o processo fácil e de rápida resolução.

8. Referências bibliográficas

- [1] J.C. Almeida, “*Estudo numérico e experimental de fluxos transientes em redes de distribuição de gás natural*”, Tese de Doutorado, Universidade Católica do Paraná - PUC-PR, Brazil 2013.
- [2] F. Abdolahi, A. Mesbah, R.B. Boozarjomehry, The effect of major parameters on simulation results of gas pipelines. *International Journal of Mechanical Sciences* 49: 989-1000, 2007.
- [3] M.V. Lurie, *Modeling of oil product and gas pipeline transportation*, Wiley-Blackwell. 2008.
- [4] M.L.Moody, An approximate formula for pipe friction factors. *Transactions of ASME* 69: 1005-11.
- [5] J.Nikurase, Stromangsgesetze in rauhen rohren. *Ver. Dtsch. Ing. Forschungsheft* 361, vol. B, Berlin: VDI Verlag, 1933.
- [6] P.M. Coelho, C. Pinho, Considerations about equations for stedy state flow in natural gas pipelines. *ABCM* 2007, Vol. XXIX, nº 3.
- [7] H. Golshan, *Pipeline Design & Construction: A Practical Approach*. ASME Press, 2003.
- [8] C.F. Colebrook, C.M. White, Experiments with fluid friction in roughened pipes. *Proceedings of the Royal Society of London*, 1937.
- [9] API Project 65, *Viscosity of light hydrocarbons monograph on API Research Project 65*, American Petroleum Institute, 1965.