

FATOR “C” - RUGOSIDADE

Rugosidade é definida no caso particular das tubulações, aquela que tem uma anomalia interna, representada por protuberâncias, rugas ou ainda crateras em sua estrutura interna natural quando nova ou após envelhecimento pelo uso.

A rugosidade é medida por um instrumento denominado rugosímetro. Esse instrumento com seu braço mecânico contendo na ponta uma agulha diamantada, desliza sobre uma determinada superfície, transmitindo suas deformidades planas para um leitor analisador eletrônico, previamente calibrado em termos de asperezas ou rugosidade milimétricas. Esse processo é bem parecido com a leitura de um disco de vinil, onde a agulha do pick up discrimina a música gravada no disco tipo long play ou não.

A unidade de medida do rugosímetro, no sistema universal é o metro. Todavia, seu valor pode variar de algumas frações do micro até vários milímetros de espessura.

A rugosidade é a responsável pelo atrito ou a resistência a passagem do fluido, deformando o que seria ideal, o perfil retangular, para uma curvatura parabólica comumente denominado, perfil de velocidade. A consequência da resistência a passagem ou ao escoamento fluídico internamente sobre as paredes do tubo é a perda de pressão ou energia distribuída ao longo do mesmo. No limite da parede, a velocidade fluídica é zero, aumentando progressivamente até ao centro, onde a velocidade é máxima, diminuindo também progressivamente até chegar ao valor zero no outro extremo do tubo, dando origem ao que chamamos de perfil ou curva parabólica.

Em um escoamento normal, o atrito entre as partículas do fluido e, dessas com as paredes do tubo é determinado pela fórmula universal de Darcy. Em sua apresentação mais atualizada, ela vem representada por:

$$H_f = f \cdot LV^2/2gD \quad (\text{formula de Darcy})$$

ou

$$f = H_f \cdot D \cdot 2g/L \cdot V^2$$

onde:

H_f = perda de carga (m)

f = coeficiente de atrito (valor absoluto)

L = comprimento da tubulação (m)

V = velocidade média do fluido (m)

D = diâmetro da tubulação (m)

g = aceleração da gravidade local (m/s²)

COEFICIENTE DE ATRITO “f” PARA FERRO FUNDIDO OU AÇO

Diâmetro nominal mm	Velocidade Média m/s							
	0,20	0,40	0,60	0,80	1,00	1,50	2,00	3,00
25	0,039	0,034	0,032	0,030	0,029	0,027	0,026	0,025
38	0,037	0,033	0,031	0,029	0,029	0,027	0,026	0,025
50	0,035	0,032	0,030	0,028	0,027	0,026	0,026	0,024
75	0,034	0,031	0,029	0,027	0,026	0,025	0,025	0,024
100	0,033	0,030	0,028	0,026	0,026	0,025	0,025	0,023
150	0,031	0,028	0,026	0,025	0,025	0,024	0,024	0,022
200	0,030	0,027	0,025	0,024	0,024	0,023	0,023	0,021
250	0,028	0,026	0,024	0,023	0,023	0,022	0,022	0,020
300	0,027	0,025	0,023	0,022	0,022	0,021	0,021	0,019
350	0,026	0,024	0,022	0,022	0,022	0,021	0,021	0,018
400	0,024	0,023	0,022	0,021	0,021	0,020	0,020	0,018
450	0,024	0,022	0,021	0,020	0,020	0,020	0,020	0,017
500	0,023	0,022	0,020	0,020	0,019	0,019	0,019	0,017
550	0,023	0,021	0,019	0,019	0,018	0,018	0,018	0,016
600	0,022	0,020	0,019	0,018	0,018	0,017	0,017	0,015

TABELA I - Valores do coeficiente de atrito para tubos novos de ferro fundido ou aço conduzindo água fria (tabela extraída do livro Azevedo Netto 8ª edição).

Obs. 1 – No caso particular do diâmetro do tubo aumentar, tendendo para um valor muito grande, o coeficiente de atrito “f” tenderá para valores próximos de zero.

Em experimentos práticos de Laboratório, realizado pela Lamon Produtos-BH, levantou-se o valor de “f” para um tubo novo, de PVC marrom de 105 mm de diâmetro interno onde se determinou medindo e, calculando, os valores de “f”, constante da tabela II.

Coeficiente “f” para tubo de PVC – valores medidos e calculados

Diâmetro mm	Velocidade m/s	Hf medido mm H2O	Vazão Q (l/s)	Reynolds $Re = VD/\nu$	“f” calculado	Fator “C” calculado
105 mm	0,29	2,0	2,50	30.450	0,023874	148,7
“	0,52	6,0	4,50	54.600	0,022250	147,8
“	0,74	12,0	6,44	77.700	0,021974	145,6
“	0,99	20,0	8,60	103.950	0,020462	147,5
“	1,47	41,0	12,00	154.350	0,019025	148,5
“	2,01	73,0	17,40	211.050	0,018119	148,3
“	2,51	108,0	21,70	263.550	0,017190	149,7
“	3,03	153,0	26,20	318.150	0,016710	149,2
“	3,37	186,0	29,20	353.850	0,016422	150,2

Tabela II – Valores medidos com padrão magnético de vazão e maleta eletrônica de diferencial de pressão. Comprimento da tubulação em teste, 2,05 metros. $A=0,008659m^2$.

O coeficiente de atrito “f” tende a ter pequena variação, aumentando de valor com a diminuição da velocidade, conforme tabela II assim também como mostra o diagrama de Moody ou a plotagem dos experimentos de Nikuradse.

Para fins práticos, em regime de escoamento turbulento desenvolvido, que é a normalidade dos escoamentos, podemos considerar que o coeficiente “f” de atrito tende para uma constante quando a velocidade ou melhor o número de Reynolds estiver acima da zona de transição. É importante observar, fig. I, diagrama de Moody, que a velocidade V, onde começa a transição, esta abaixo do $Re = 5000$ para uma tubulação de diâmetro D. Todavia, para a mesma velocidade V com um novo diâmetro, agora maior, o novo número de Reynolds será bem maior, por exemplo 50.000. Sabe-se que o número de Reynolds vem de uma relação de forças, força de inercia sobre força de viscosidade, da qual se chega ou se deduz que:

$$Re = VD\rho/\mu \text{ ou } VD/\nu,$$

ρ =densidade

μ =viscosidade absoluta

ν =viscosidade cinemática

Por outro lado, o coeficiente de atrito “f”, para a mesma velocidade V, e a mesma rugosidade, “f” diminuí acentuadamente com o aumento do diâmetro do tubo.

Esse novo fato, é fácil de ser percebido ou comprovado, pois tudo acontece como se diluísse a rugosidade no diâmetro do tubo, significando dividir o valor medido da rugosidade “e” pelo diâmetro “D” do tubo. Como a rugosidade tem por dimensional o metro, e o diâmetro também o metro, o número resultante é absoluto, ou relativo cujo valor diminuí com o aumento do diâmetro. $\epsilon=e/D$ rugosidade relativa. Da mesma forma que a rugosidade relativa “ ϵ ” é um número sem unidade, portanto, absoluto, assim também é o coeficiente de atrito “f” que varia segundo a qualidade do tubo, sua rugosidade ou ainda segundo seu tempo de uso escoando água. Assim sendo, por exemplo, 1000 metros de tubo de aço, relativamente novo, com 100 milímetro de diâmetro interno tendo um coeficiente de atrito igual a 0,026, transportando água a uma velocidade de +/-1,5 m/s, teria uma perda de carga de :

$$H_f = 0,026 \cdot L \cdot V^2 / 2g \cdot D = 0,026 \cdot 1000 \cdot (1,5)^2 / 19,6 \cdot 0,1 = 30,6 \text{ (metros de perda)}.$$

Essa mesma velocidade num tubo de 500 milímetros de diâmetro daria 5,97 metros de perda. $H_f = 0,026 \cdot 1000 \cdot (1,5)^2 / 19,6 \cdot 0,5 = 5,97 \text{ (metros de perda)}$.

No diagrama de Moody, figura 1 pode se observar que o coeficiente de atrito “f” varia acentuadamente com a variação da relação, rugosidade “e” e diâmetro “D” representado aqui pela letra “ ϵ ” denominada, rugosidade absoluta ou relativa e, com a velocidade, representada aqui pelo número de Reynolds. Quando o número de Reynolds se encontra fora da região laminar ou da região de transição o comportamento do coeficiente de atrito “f” é considerado estável ou único para toda zona rugosa, independente do nº de Reynolds. Essa afirmação é muito errônea, apesar de ser usada na prática, pois na rangeabilidade de 11,6:1, o coeficiente “f” variou 30%, conforme tabela II em conteste.

Todavia, para tubos de mesmo material e mesma idade de utilização, ou ainda, tubo novo, o Fator “C” é constante para qualquer diâmetro.

DIAGRAMA DE MOODY

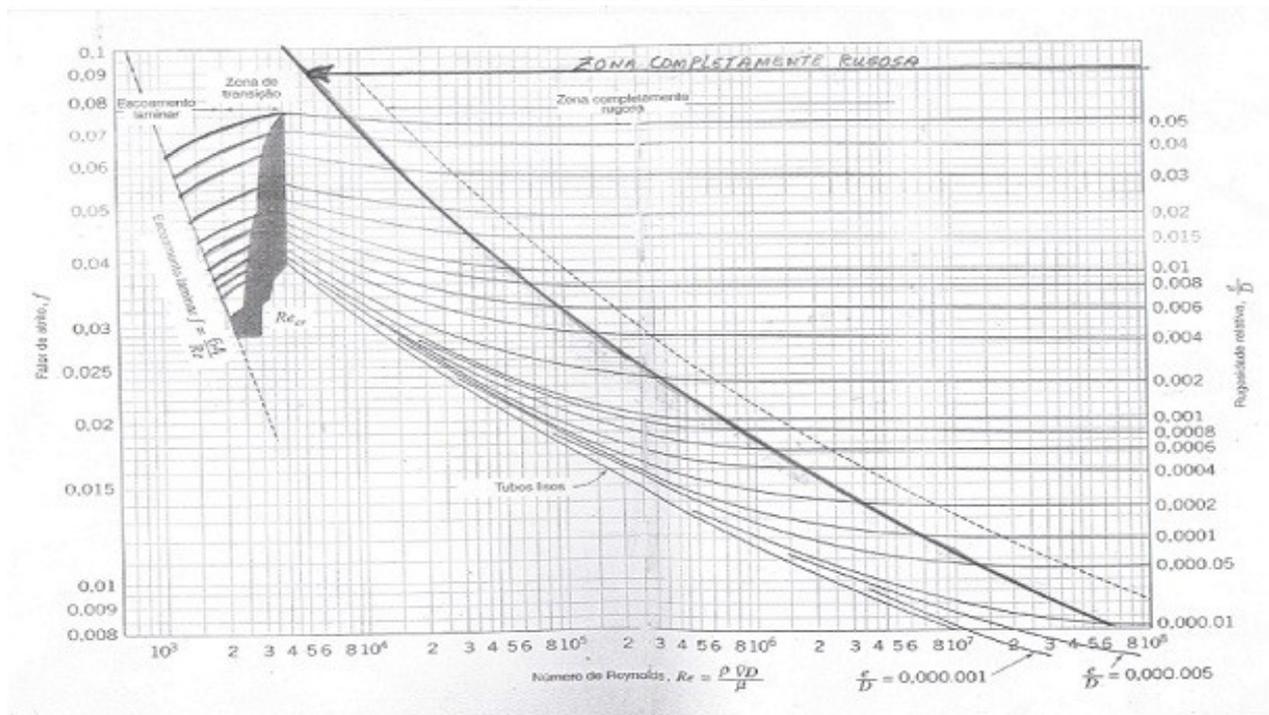


Fig. 1 - Fator de atrito para escoamento em tubos circulares comercial. Gráfico extraído do livro *Mecânica dos Fluidos – Fox & Macdonald*.

Obs. 2 – A linha cheia na região rugosa assim como as linhas da região de transição para a região do escoamento laminar, foram acrescentadas pelo autor desse artigo.

Os cientistas Hazen e Willians, estudaram o comportamento do atrito em tubulações, calculando ou determinando de forma absoluta o fator discriminativo da encrustação nas tubulações. Esse fator é denominado Fator “C”. Quando a tubulação é nova, o fator “C” é um número relativamente grande diminuindo seu valor com os anos de uso no transporte de água. Sua rugosidade ou incrustação aumenta e, o número correspondente ao fator “C” diminuí. Levando essa ideia ao limite, pode-se dizer que, para uma tubulação sem atrito algum, seu fator “C”, tenderá para um número muito grande, por exemplo infinito. Por outro lado seu coeficiente de atrito “f” tenderia para zero. Essas duas grandezas são contrárias. Nesse particular, cumpre observar que é oportuno desenvolver e formatar uma nova equação que relacione, conhecendo um dos dois números, fator “C” ou coeficiente “f”, determinar o outro através da nova formula.

Muitas fórmulas práticas tem sido usada ou desenvolvidas para o cálculo do atrito em tubulações com água. Os cientistas Hazen & Willians foram os que mais avançaram nesse estudo, até porque se beneficiaram dos estudos de vários outros antecessores como por exemplo Darcy, Nikuradse, Reynolds, Weisback, Flamant, Manning, Bazin , entre outros da época. Em 1939 lançaram, divulgando seus estudos e a formula que leva hoje seus nomes. A formula de Hazen&Willians é empírica, tendo todavia, boa aceitação no meio acadêmico e na prática das Empresas de água nos dias de hoje. Apesar de não resolver todos os problemas do assunto, perda de carga, a formula é:

$$C = Q/0,2788 \cdot D^{2,65} J^{0,54} ,$$

onde:

C = Fator de encrustação ou rugosidade
 Q = Vazão (m^3/s)
 D = Diâmetro interno da tubulação (m)
 J = Perda de carga unitária (adimensional) = dP/L (m/m)
 dP = Perda de carga (mC.A.) valor medido
 L = Comprimento da tubulação em teste (m)

O fator “C”, também denominado coeficiente de encrustação, ou ainda coeficiente característico da tubulação, é um número puro calculado de forma empírica.

Na tabela III, tem-se alguns valores característicos do fator “C” segundo Hazen & Willians e o respectivo coeficiente “f” segundo Darcy.

Para o tubo de PVC, o coeficiente “f” e o seu respectivo fator “C” foi levantado e calculado na prática em mesa de ensaio com água.

Observando a tabela I e, a respectiva tubulação em uso, a seleção de um coeficiente aplicável ou a sua validação na prática é difícil, a menos que se tenha uma vasta e forte experiência no assunto. Todavia, a fórmula apresentada, tanto a de Darcy como a de Hazen&Willians é muito útil quando se tem equipamentos para o levantamento dos parâmetros requeridos. Com a maleta eletrônica e o aplicativo do programa MDHidro para essa finalidade, em questão de minutos se determina o fator “C” de uma tubulação pesquisada.

EFEITO DA IDADE E USO DE UM TUBO:

A perda de pressão por atrito é sensível as variações do diâmetro, velocidade, rugosidades do tubo, (fator “C”) ou ainda, coeficiente “f”. Para uma dada vazão e um dado fator “C” a perda de pressão varia inversamente com o valor do diâmetro. Como a incrustação diminui o diâmetro interno do tubo, cientistas afirmam que 2% na redução do diâmetro interno pela rugosidade pode causar uma perda de 10% na pressão, assim como 5% de redução do diâmetro aumenta a perda de pressão para 23%. Outros ainda apontam que dependendo do material do tubo e da qualidade da água, a cada 4 anos de uso a rugosidade em um tubo de aço, aumenta cerca de 20% em tese.

Tabela III- Valores de “C” e envelhecimento do tubo segundo Hazem&Willians

MATERIAL	Fator “C”	Coeficiente “f”	“f” = $f(V, D, e.)$
Tubo de aço, novo em trecho reto	140	-x-x-x-x-x-x-	
Tubo de aço bem liso	130	-x-x-x-x-x-x-	
Tubo de aço revestido	110	-x-x-x-x-x-x-	
Tubo de aço fundido	100	-x-x-x-x-x-x-	
Tubo de aço rebitado	95	-x-x-x-x-x-x-	
Tubo de aço velho em má condição	60 a 80	-x-x-x-x-x-x-	
Tubo de PVC novo	150	0,016422	

Valores extraídos do livro Elementary Fluid Mechanics – by J.K. VENNARD 4ª Edirion
 Exceção para o tubo de PVC novo

Conhecendo somente o fator “C”, ou o coeficiente de atrito “f”, teoricamente não se tem até no momento, condições de se determinar o outro fator ou o coeficiente correlacionado, senão na prática medi-los em laboratório como foi exemplificado na tabela II. Ainda, considerando a tabela II, observa-se que o fator “C” não depende da velocidade, senão somente, o coeficiente de atrito “f” que pela mesma tabela, demonstra uma variação de +/- 30% conforme já declarado anteriormente.

CONCLUSÃO

Cumprir observar que é oportuno desenvolver e formatar uma nova equação que relacione o fator “C” com o coeficiente “f”, ou seja, $f = f(V, D, e)$. Conhecendo um dos fatores determinar o outro através da nova fórmula. Como se pode observar, o coeficiente “f”, de atrito, é uma função variável que depende da velocidade “V”, do diâmetro “D” e, da rugosidade do tubo “e”. Por sua vez, a rugosidade “e” que é um número, possível de ser medido, podendo se tornar rugosidade relativa, pela sua divisão pelo diâmetro do tubo, conforme apresentado ou inserido no gráfico de Moody, $\epsilon = e/D$, figura I. Dessa forma, “f” se tornaria uma função $f = f(V, e/D)$. Reforço aqui, na conclusão desse artigo, uma lacuna possível de ser preenchida com uma nova oportunidade de se dissertar, deduzir e apresentar uma nova equação a ser proposta, ou seja, fator “C” uma função de “f”.

Geraldo Lamon

Artigo desenvolvido em agosto de 2013