

TRAÇADO DA CCI EM INSTALAÇÕES DE RECALQUE COM USO DO EXCEL

Eng^o Luiz Camargo

A curva característica da instalação - CCI, de uma tubulação de recalque, é obtida com a equação da altura manométrica em função da vazão, considerando as perdas de carga totais nas linhas de sucção e recalque. Levando a equação ao Excel, atribuindo-se valores para a vazão encontra-se os correspondentes valores da carga manométrica, formando, desta forma, o conjunto de pontos $Q \times Hm$ necessários para traçar o gráfico da CCI, também no próprio Excel.

PERDAS NA SUCÇÃO

Perda distribuída:

$$HDIST_s = \frac{8f_s L_s Q^2}{g\pi^2 D_s^5} \quad (1)$$

Perdas singulares:

$$HSING_s = \frac{8\Sigma k_s Q^2}{g\pi^2 D_s^4} \quad (2)$$

Perda de carga total na sucção:

$$H_{SUC} = HDIST_s + HSING_s$$

$$H_{SUC} = \frac{8f_s L_s Q^2}{g\pi^2 D_s^5} + \frac{8\Sigma k_s Q^2}{g\pi^2 D_s^4} \quad (3)$$

PERDAS NO RECALQUE

Perda distribuída:

$$HDIST_R = \frac{8f_R L_R Q^2}{g\pi^2 D_R^5} \quad (4)$$

Perdas singulares:

$$HSING_R = \frac{8\Sigma k_R Q^2}{g\pi^2 D_R^4} \quad (5)$$

Perda de carga total no recalque:

$$H_{REC} = HDIST_R + HSING_R$$

$$H_{REC} = \frac{8f_R L_R Q^2}{g\pi^2 D_R^5} + \frac{8\Sigma k_R Q^2}{g\pi^2 D_R^4} \quad (6)$$

PERDA DE CARGA TOTAL NA INSTALAÇÃO

$$H_{TOT} = H_{SUC} + H_{REC}$$

$$H_{TOT} = \frac{8f_S L_S Q^2}{g\pi^2 D_S^5} + \frac{8\Sigma k_S Q^2}{g\pi^2 D_S^4} + \frac{8f_R L_R Q^2}{g\pi^2 D_R^5} + \frac{8\Sigma k_R Q^2}{g\pi^2 D_R^4}$$

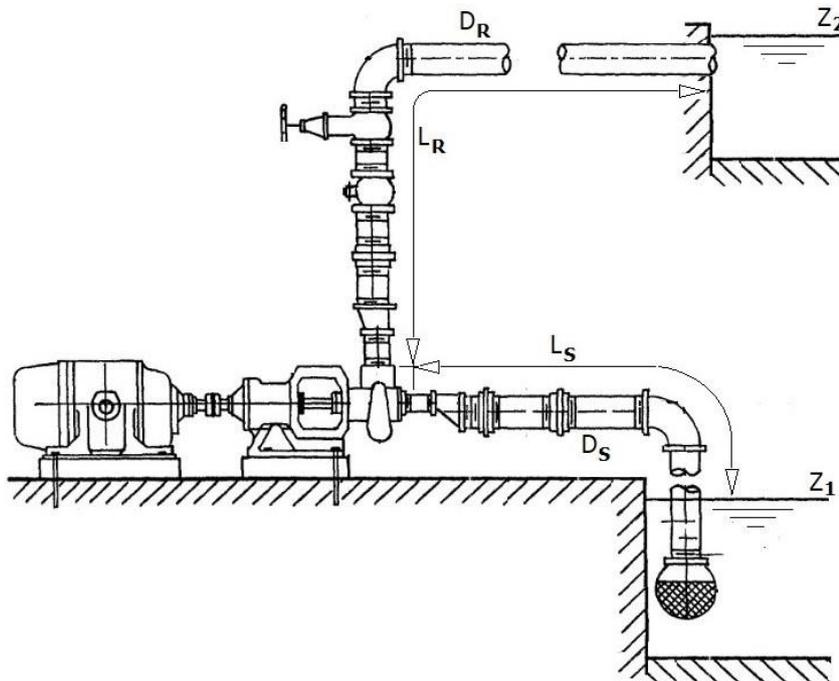
$$H_{TOT} = \frac{8Q^2}{g\pi^2} \left(\frac{f_S L_S}{D_S^5} + \frac{\Sigma k_S}{D_S^4} + \frac{f_R L_R}{D_R^5} + \frac{\Sigma k_R}{D_R^4} \right) \quad (7)$$

ALTURA MANOMÉTRICA TOTAL

Altura manométrica total consiste na soma da perda de carga total, com o desnível geométrico entre os reservatórios superior e inferior.

$$Hm = H_{TOT} + (Z_1 - Z_2)$$

$$Hm = \frac{8Q^2}{g\pi^2} \left(\frac{f_S L_S}{D_S^5} + \frac{\Sigma k_S}{D_S^4} + \frac{f_R L_R}{D_R^5} + \frac{\Sigma k_R}{D_R^4} \right) + (Z_2 - Z_1) \quad (8)$$



onde:

Hm = altura manométrica total (m)

Q = vazão (m^3/s)

L_S = comprimento da tubulação de sucção (m)

L_R = comprimento da tubulação de recalque (m)

D_S = diâmetro da tubulação de sucção (m)

D_R = diâmetro da tubulação de recalque (m)

f_S = fator de atrito da tubulação de sucção (adimensional)

f_R = fator de atrito da tubulação de recalque (adimensional)

Z_1 = cota topográfica da superfície livre do reservatório inferior (m)

Z_2 = cota topográfica da superfície livre do reservatório superior (m)

Σk_S = somatório dos coeficientes de perda de carga das singularidades na sucção (adimensional)

Σk_R = somatório dos coeficientes de perda de carga das singularidades no recalque (adimensional)

g = aceleração da gravidade local (m/s²)

O fator de atrito, na sucção e recalque, pode ser obtido por iteração com a equação de Colebrook-White:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left(\frac{\varepsilon}{3,7D} + \frac{2,51}{Re\sqrt{f}} \right)$$

ou, de forma mais conveniente, pela equação explícita de Swamee-Jain:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left(\frac{\varepsilon}{3,7D} + \frac{5,74}{R_e^{0,9}} \right) \quad (9)$$

onde o Número de Reynolds é dado por:

$$R_e = \frac{4Q}{\pi D \nu} \quad (10)$$

onde:

ε = rugosidade equivalente da tubulação (m)

ν = viscosidade cinemática do fluido (m²/s)

Substituindo Eq. (10) na Eq. (9):

$$f = 0,25 \cdot \left[-\log_{10} \left(\frac{\varepsilon}{3,7D} + 4,618 \left(\frac{Q}{D\nu} \right)^{-0,9} \right) \right]^{-2} \quad (11)$$

Portanto, substituindo Eq. (11) nos respectivos valores de f na Eq. (8), resulta em:

$$H_m = \frac{8Q^2}{g\pi^2} \left\{ \frac{L_S}{4D_S^5} \left[-\log_{10} \left(\frac{\varepsilon_S}{3,7D_S} + 4,618 \left(\frac{Q}{D_S\nu} \right)^{-0,9} \right) \right]^{-2} + \frac{\Sigma k_S}{D_S^4} + \frac{L_R}{4D_R^5} \left[-\log_{10} \left(\frac{\varepsilon_R}{3,7D_R} + 4,618 \left(\frac{Q}{D_R\nu} \right)^{-0,9} \right) \right]^{-2} + \frac{\Sigma k_R}{D_R^4} \right\} + (Z_2 - Z_1) \quad (12)$$

Com a Eq. (12) levada no EXCEL, atribuindo-se valores para Q encontra-se os correspondentes valores de H_m , formando, desta forma, como dito, o conjunto de pontos necessários para construir o gráfico da CCI, também no próprio Excel.

Como um exercício, no Excel a Eq. (12) tem a seguinte sintaxe, localizada na célula E3:

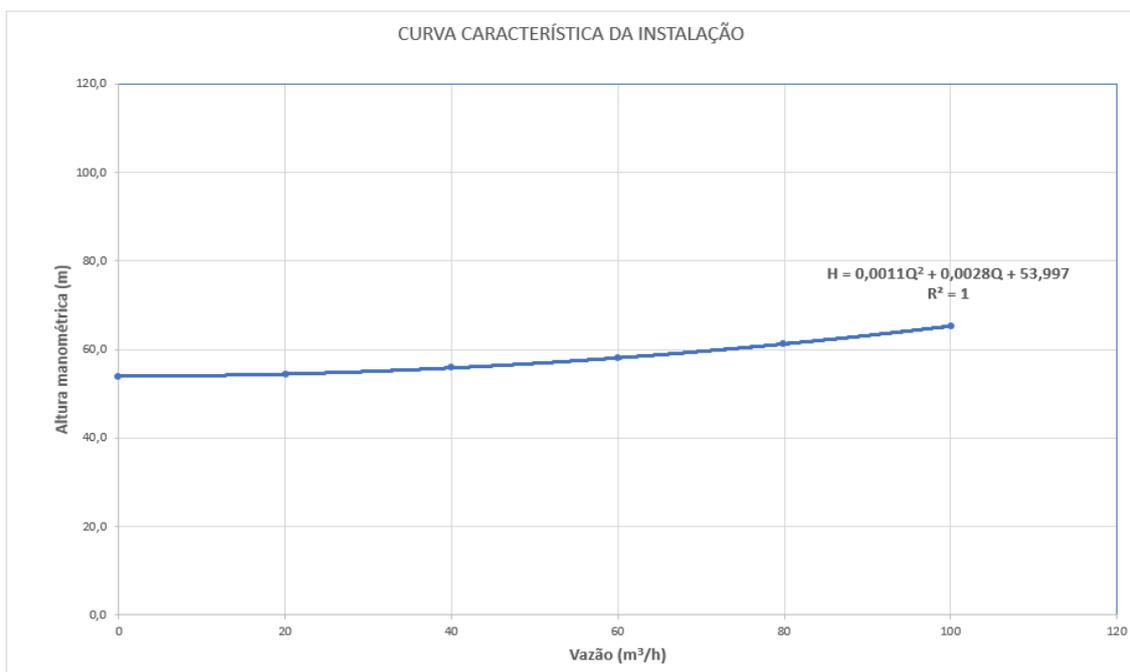
$$=8*(D2/3600+0,00001)^2/B\$11/9,8696*(B\$1/4/B\$3^5*(-LOG10(B\$5/3,7/B\$3+4,618*((D2/3600+0,00001)/B\$3/B\$10)^(-0,9)))^(-2)+B\$7/B\$3^4+B\$2/4/B\$4^5*(-LOG10(B\$6/3,7/B\$4+4,618*((D2/3600+0,00001)/B\$4/B\$10)^(-0,9)))^(-2)+B\$8/B\$4^4)+B\$9$$

Em seguida, arrastada até a célula E7, gera a tabela $Q \times H_m$ mostrada na imagem a seguir.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	Comprimento tubo sucção (m) =	3		Q(m³/h)	H(m)							
2	Comprimento tubo recalque (m) =	54		0	54,0							
3	Diâmetro tubo sucção (m) =	0,125		20	54,5							
4	Diâmetro tubo recalque (m) =	0,1		40	55,9							
5	Rugosidade equiv. tubo sucção (m) =	0,00006		60	58,1							
6	Rugosidade equiv. tubo recalque (m) =	0,0001		80	61,3							
7	Soma coef. singularidades sucção =	7,55		100	65,3							
8	Soma coef. singularidades recalque =	3,35										
9	Diferença níveis reservatórios (m) =	54										
10	Viscosidade cinemática fluido (m²/s) =	0,000001										
11	Aceleração gravidade local (m/s²) =	9,806										

No Excel a fórmula passou pelos seguintes ajustes: a vazão (D2) foi dividida por 3600 para converter m³/h para m³/s. Também foi acrescentado 0,00001 à vazão já que este artifício não altera o valor da altura manométrica exibida com uma casa decimal, e evita o erro de divisão por zero no caso de vazão nula.

Selecionando esse conjunto de pontos e indo em "Inserir" > "Gráficos" > "Dispersão", o gráfico dos pontos $Q \times H_m$ é gerado. Adicionando linha de tendência e selecionando o tipo "Polinomial", grau 2, o Excel gera a curva de regressão. Gera também o coeficiente de determinação R^2 que representa a porcentagem de pontos que obedecem a equação regressiva encontrada.



Referências:

- Ignácio, R.F.; "Vídeos sobre Curvas Característica da Instalação". Disponibilizado em <https://www.youtube.com/watch?v=m7KhGUQY0ys&t=104s> e <https://www.youtube.com/watch?v=MgS5fNf6L9Q>. Acesso em 20/11/2021.
- Mello, C.R.; Yanagi Jr, T.; "Escolha de Bombas Centrífugas", Univ. Fed. de Lavras, Lavras, [19--?].
- Porto, R.M.; "Hidráulica Básica", EESC-USP, São Carlos, 2004.
- Tullis, J.P.; "Hydraulics of Pipelines", Wiley & Sons, New York, 1989.

LC - 26/11/2021.