

O presente texto tem por objetivo a análise de alguns aspectos da sucção a serem considerados no dimensionamento de tubulações de recalque, que aqui serão examinados através do cálculo da vazão no conduto, utilizando para tal as equações de Darcy-Weisbach e de Swamee-Jain, fazendo uso da conhecida ferramenta "Atingir Meta" do Excel, onde são previamente conhecidos o comprimento, diâmetro e rugosidade dos tubos, a viscosidade cinemática do líquido em escoamento, o desnível geométrico entre os reservatórios, e a potência e rendimento (ou curva) da bomba. Ao final é apresentada uma planilha contendo um problema ilustrativo.

A perda de carga em tubulações, pela equação de Darcy-Weisbach, pode ser expressa como:

$$h_f = \frac{8fLQ^2}{g\pi^2 D^5} \quad (1)$$

onde:

$Q$  = vazão (m<sup>3</sup>/s)

$D$  = diâmetro do tubo (m)

$h_f$  = perda de carga ao longo do comprimento do tubo (mca)

$f$  = fator de atrito de Darcy-Weisbach (adimensional)

$L$  = comprimento do tubo conectado ao reservatório (m)

$g$  = aceleração da gravidade local (m/s<sup>2</sup>)

Para cálculo do fator de atrito Swamee e Jain (1976) desenvolveram a seguinte expressão:

$$f = 0,25 \left[ \log_{10} \left( \frac{k}{3,7D} + \frac{5,74}{R_e^{0,9}} \right) \right]^{-2} \quad (2)$$

O Número de Reynolds, por definição, é dado por:

$$R_e = \frac{4Q}{\pi Dv}$$

Substituindo esta última expressão na Eq. (2):

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

onde:

$k$  = rugosidade equivalente da parede do tubo (m)

$v$  = viscosidade cinemática do líquido em escoamento (m<sup>2</sup>/s)

Em sistemas de recalque, bombeando água, a vazão está relacionada com a altura manométrica através da equação:

$$P = \frac{QH_m}{0,075\eta} \quad (4)$$

onde:

$P$  = potência do conjunto motobomba (CV) (nota: 1 kW ≈ 1,36 CV)

$\eta$  = rendimento do conjunto motobomba (%)

$H_m$  = altura manométrica total na bomba (m)

Tipicamente um sistema elevatório (ou de recalque) é composto pelo conjunto de tubulações, intermediados por bombas e acessórios, necessário ao transporte de certa vazão de algum líquido de um reservatório  $R_1$ , via de regra situado num nível inferior, para outro reservatório  $R_2$ , via de regra situado num nível superior conforme mostra a figura a seguir. Frequentemente, nos sistemas de abastecimento de água esses reservatórios são abertos à atmosfera e com níveis constantes, fato este que permite o escoamento ser tratado como permanente.

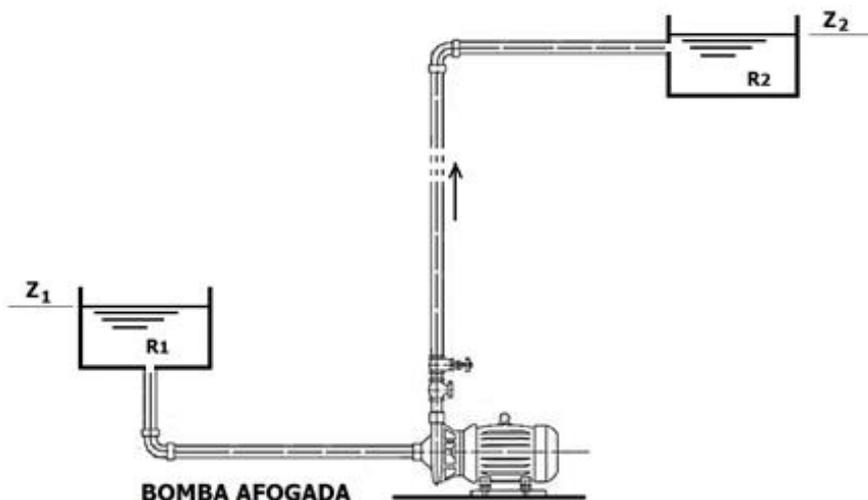
Então, as partes básicas que compõem um sistema de recalque são:

- a) Conduto de sucção: constituído de tubos e acessórios destinados a conduzir o líquido do reservatório  $R_1$  até a bomba. É o trecho da tubulação à montante da bomba.
- b) Conjunto elevatório: constituído de uma ou mais bombas e seus respectivos motores, destinado a adicionar energia de pressão ao escoamento do líquido.
- c) Conduto de recalque: constituído de tubos e acessórios destinados a conduzir o líquido da bomba até o reservatório  $R_2$ . É o trecho da tubulação à jusante da bomba.



Para os fins do presente texto, com relação ao trecho de sucção, onde o conduto conduz o líquido do reservatório inferior até a bomba, o conjunto elevatório se configura de duas maneiras:

- 1 - Bomba afogada: assim chamada quando o eixo da bomba está situado numa cota abaixo da cota do nível de água do reservatório inferior.
- 2 - Bomba não afogada: quando o eixo da bomba está situado numa cota acima da cota do nível de água do reservatório inferior.



Em qualquer dos casos a altura manométrica na bomba será:

$$H_m = Z_2 - Z_1 + h_s + h_R \quad (5)$$

onde,

$H_m$  = altura manométrica (m)

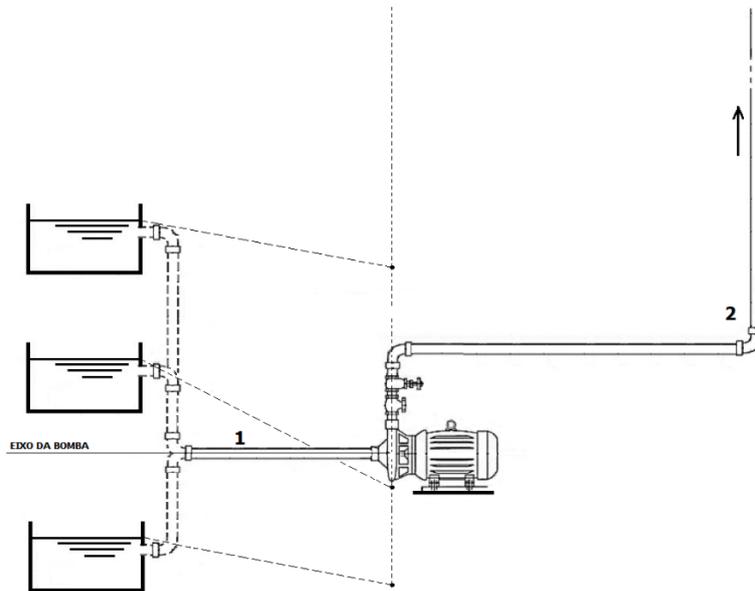
$Z_1$  = cota topográfica do reservatório inferior (m)

$Z_2$  = cota topográfica do reservatório superior (m)

$h_s$  = perda de carga na tubulação 1 de sucção incluindo os acessórios (m)

$h_R$  = perda de carga na tubulação 2 de recalque incluindo os acessórios (m)

Cabe ressaltar que a perda de carga no conduto de sucção sempre será somada, e nunca subtraída, independente da bomba estar afogada ou não. Na figura a seguir a linha tracejada representa as diferentes posições que a linha piezométrica pode assumir na sucção, dependendo do comprimento, diâmetro e rugosidade do tubo de sucção, da viscosidade e velocidade do líquido bombeado, das singularidades presentes e da posição topográfica da superfície do reservatório de sucção em relação ao eixo da bomba.



Além disso, pela equação da continuidade a vazão que chega na bomba é igual à vazão que sai, qual seja, a vazão no trecho 1 é igual à vazão no trecho 2, isto é:

$$Q = Q_1 = Q_2$$

Então, considerando as perdas de carga singulares como comprimentos equivalentes já adicionados aos comprimentos dos condutos, da Eq. (1) tem-se:

$$h_s = \frac{8f_1L_1Q^2}{g\pi^2D_1^5} \quad (6)$$

$$h_R = \frac{8f_2L_2Q^2}{g\pi^2D_2^5} \quad (7)$$

Levando as Eqs. (6) e (7) na Eq. (5):

$$H_m = Z_2 - Z_1 + \frac{8f_1L_1Q^2}{g\pi^2D_1^5} + \frac{8f_2L_2Q^2}{g\pi^2D_2^5} \quad (8)$$

Substituindo a Eq. (8) na Eq. (4) obtém-se:

$$\frac{8Q^3}{g\pi^2} \left( \frac{f_1 L_1}{D_1^5} + \frac{f_2 L_2}{D_2^5} \right) + Q(Z_2 - Z_1) - 0,075\eta P = 0 \quad (9)$$

Substituindo a Eq. (3) na Eq. (9) relativamente aos trechos de sucção e recalque:

$$\frac{2Q^3}{g\pi^2} \left\{ \frac{L_1}{D_1^5} \left[ \log_{10} \left( \frac{k_1}{3,7D_1} + 4,618 \left( \frac{D_1 v}{Q} \right)^{0,9} \right) \right]^{-2} + \frac{L_2}{D_2^5} \left[ \log_{10} \left( \frac{k_2}{3,7D_2} + 4,618 \left( \frac{D_2 v}{Q} \right)^{0,9} \right) \right]^{-2} \right\} + Q(Z_2 - Z_1) - 0,075\eta P = 0 \quad (10)$$

Então, aqui está deduzida uma equação para a vazão. Mas, como se vê, trata-se de uma equação implícita em  $Q$  e, portanto, não possui solução expressa de forma explícita. De um modo geral a solução de equações desta natureza envolve algum processo iterativo de aproximações sucessivas. O mais apropriado é utilizar o cálculo automatizado, por processo computacional, tal como faz a conhecida ferramenta "Atingir Meta" do Excel, que será utilizada no presente caso. A solução com esta ferramenta consiste basicamente em utilizar o primeiro membro da Eq. (10) como "função objetivo" cuja meta a se atingida é zero, fazendo variar  $Q$ . Portanto o valor de  $Q$  que tornar nulo o primeiro membro da Eq. (10) será a solução do problema. Então transportando a função objetivo com os dados do problema para a célula E6 do Excel, e partindo de um valor inicial de  $Q$ , digamos 0,1, a função Atingir Meta encontra imediatamente o valor final da vazão, como mostra a solução do problema apresentado a seguir.

#### RESOLUÇÃO DE PROBLEMA:

Numa estação elevatória, uma bomba recalca água a 20 °C através de uma tubulação de PVC DEFOFO 1 MPa DN-200 com extensão de 2600. A tubulação de sucção tem 12 m de extensão e DN-250. O desnível geométrico entre o reservatório inferior e o superior é de 67 m. A bomba é acionada por um motor de 50 CV com rendimento de 69%. Considerar  $g = 9,806 \text{ m/s}^2$  e determinar a vazão.

Dados do problema:

- $D_1 = 0,2520 \text{ m}$
- $L_1 = 12 \text{ m}$
- $k_1 = 0,00006 \text{ m}$
- $D_2 = 0,2042 \text{ m}$
- $L_2 = 2600 \text{ m}$
- $k_2 = 0,00006 \text{ m}$
- $Z_2 - Z_1 = 67 \text{ m}$
- $Pot = 50 \text{ CV}$
- $\eta = 69\% = 0,69$
- $v = 0,000001 \text{ m}^2/\text{s}$

The screenshot shows an Excel spreadsheet with the following data in columns A and B:

	A	B
1	<b>ALGUMAS CONSIDERAÇÕES SOBRE SUÇÇÃO - FUNÇÃO ATINGIR META:</b>	
2	$D_1$ (m) =	0,2520
3	$L_1$ (m) =	12,00
4	$k_1$ (m) =	0,000060
5	$D_2$ (m) =	0,2042
6	$L_2$ (m) =	2600,00
7	$k_2$ (m) =	0,000060
8	$Z_2 - Z_1$ (m) =	67,00
9	$Pot$ (CV) =	50,00
10	$\eta$ =	0,690
11	$v$ (m <sup>2</sup> /s) =	0,0000010
12	$g$ (m/s <sup>2</sup> ) =	9,806

The formula bar for cell E6 shows the goal function:  $=2*E7^3/(B12*PI()^2)*(B3/B2^5*(LOG10(B4/(3,7*B2)+4,618*(B2*B11/E7)^0,9))^2 + B6/B5^5*(LOG10(B7/(3,7*B5)+4,618*(B5*B11/E7)^0,9))^2)+E7*B8-0,075*B10*B9$

The 'Goal Seek' dialog box shows:

- Attingir Meta com a célula E6 encontrou uma solução.
- Valor de destino: 0
- Valor atual: 0,0000

A resposta, portanto, é  $Q = 0,0329 \text{ m}^3/\text{s}$ . Confira curva característica da bomba no Apêndice.

Deve-se ter em conta, no entanto, que o dimensionamento cuidadoso de um sistema de bombeamento envolve atenção especial ao trecho de sucção da bomba, visto ser nesta parte da tubulação onde os maiores problemas podem ocorrer. Os inconvenientes mais importantes são aqueles causados pelo fenômeno conhecido como cavitação que pode gerar ruídos, vibrações, queda de rendimento e até modificar características da bomba.

Se um líquido no interior do conduto de sucção de uma bomba escoar numa região em que sua pressão cai até atingir a pressão do vapor, à temperatura local, tem início a sua vaporização, que faz com que gere bolhas de vapor na massa líquida. Arrastadas pela corrente líquida, ao alcançarem uma zona de pressão mais elevada, essas bolhas entram em colapso, por implosão, quase que instantaneamente, fenômeno este ao qual dá-se o nome de cavitação. Quando o colapso das bolhas ocorre nas proximidades ou em contato com a superfície do rotor, as forças exercidas pelo líquido ao retomar os espaços antes ocupados pelo vapor, acabam por gerar sobrepressões elevadíssimas e em curtíssimos intervalos de tempo. Conforme ressalta Jardim (1992), as sobrepressões podem chegar a 10.000 atm em espaços de tempo de 0,003 segundo. Esses colapsos ocorrendo em sequência junto à superfície metálica do rotor causam um processo danoso ao mesmo, desagregando e arrancando partículas superficiais, tendo como consequência a sua erosão e, por fim, a falha da bomba. Segundo Streeter & Wylie\*, o fenômeno é acompanhado de ruído e vibrações semelhantes à passagem de pedregulhos por uma bomba centrífuga.

Decorrente dos inconvenientes citados, a cavitação acaba por se tornar em motivo para manutenção frequente e dispendiosa dos equipamentos. Para evitar que ocorra a cavitação, ou pelo menos para prevenir que seus efeitos não sejam importantes, cuidados são requeridos no dimensionamento.

Uma recomendação corriqueira e bastante óbvia é a de que a tubulação de sucção deva ter um diâmetro comercial imediatamente maior que o da tubulação de recalque, com vistas a diminuir a velocidade e, com isto, obter menores perdas de carga.

O *NPSH* (Net Positive Suction Head) é a grandeza mais importante e mais utilizada para caracterizar a cavitação. De forma sucinta pode ser definido como a quantidade de energia contida no líquido suficiente para que a pressão interna seja superior à pressão do vapor, ao alcançar o bocal de sucção da bomba, para que não ocorra cavitação.

*NPSH* requerido é o *NPSH* mínimo exigido pelo fabricante da bomba como garantia de operação sem cavitação:

$$NPSH_r = \frac{P_a - P_v}{\gamma} + Z - \Delta H_s \quad (11)$$

*NPSH* disponível é a energia no bocal de sucção da bomba do sistema projetado que irá depender dos níveis dos reservatórios de sucção e recalque, perdas de carga, temperatura, pressão atmosférica e do desnível geométrico de sucção, portanto determinado pelo projetista:

$$NPSH_d = \frac{P_a - P_v}{\gamma} - Z - \Delta H_s \quad (12)$$

Condição de não cavitação:  $NPSH_d > NPSH_r$

Segundo Porto (2004), "Os dois termos em que há possibilidade de o projetista interferir para aumentar o *NPSH<sub>d</sub>* da instalação são a altura estática de sucção, que define a cota de assentamento do grupo motobomba em relação ao nível de água do reservatório inferior, e a perda de carga total. Destas duas, a altura estática de sucção é a variável mais sensível, assumindo-se como limite, para propósitos práticos, um valor não maior que 4 a 5 m. Conhecendo-se a curva do *NPSH<sub>r</sub>* fornecida pelo fabricante, para a vazão de recalque, a altura de sucção máxima pode ser determinada, na condição limite, igualando o *NPSH* disponível e requerido e utilizando-se as duas últimas equações, na forma":

$$Z_{\max} = \pm \left( NPSH_r - \frac{P_a - P_v}{\gamma} + \Delta H_s \right) \quad (13)$$

\* Streeter, V.L. & Wylie, E.B.; "Fluid Mechanics", McGraw-Hill, NY, 1982.

em que o sinal positivo corresponde à bomba afogada, e

$$\frac{p_a}{\gamma} = 13,6 \left( \frac{760 - 0,81h}{1000} \right) \quad (14)$$

sendo  $h$  a altitude local e  $p_v/\gamma$ , em função da temperatura, é dado pela tabela a seguir:

$T$ (°C)	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
$p_v/\gamma$ (m)	0,09	0,13	0,17	0,24	0,32	0,43	0,57	0,75	0,98	1,25
$T$ (°C)	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
$p_v/\gamma$ (m)	1,61	2,03	2,56	3,20	3,96	4,86	5,93	7,18	8,62	10,33

Fonte: Porto, 2004.

onde,

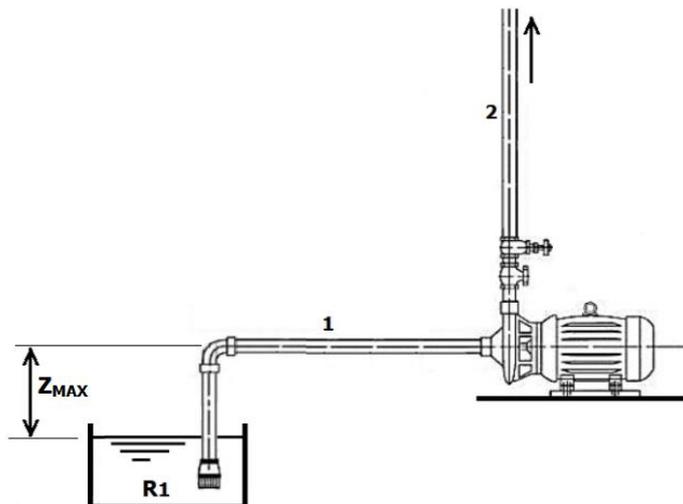
$p_v/\gamma$  = pressão de vapor da água (mH<sub>2</sub>O)

$p_a/\gamma$  = pressão atmosférica (mH<sub>2</sub>O)

$h$  = altitude local (m)

$\Delta H_s$  = somatório de todas as perdas até o bocal de entrada da bomba (m)

$Z_{max}$  = máxima altura estática de sucção (m)



Ainda segundo este autor, "o critério do  $NPSH_r$ , por utilizar uma característica da bomba fornecida pelo fabricante, é o que oferece maior segurança ao projetista".

Então, sobre o problema anteriormente resolvido, com a Eq. (13) pode-se determinar a altura estática máxima para a sucção, conforme segue:

$$Z_{max} = \pm \left( NPSH_r - \frac{p_a - p_v}{\gamma} + \Delta H_s \right)$$

$$p_a/\gamma = 13,6 \left( \frac{760 - 0,81h}{1000} \right) = 13,6 \times (760 - 0,81 \times 80) / 1000 = 10,23 \text{ m}$$

$$p_v/\gamma = 0,24 \text{ m}$$

$$\Delta H_s = 5,49 \text{ m}$$

$$NPSH_r = 4 \text{ m}$$

$$Z_{max} = - (4 - (10,23 - 0,24) + 5,49) = 0,5 \text{ m.}$$

## Bibliografia:

- 1 - Baptista, M. & Lara, M.; "Fundamentos de Engenharia Hidráulica", 4ª Edição, Editora UFMG, Belo Horizonte, 2016.
- 2 - Camargo, L.A.; "Algumas considerações sobre sucção em sistemas de bombeamento". Vitória, Set/2020. Disponível em <http://hidrotec.atspace.co.uk/bombeame.htm>. Acesso: Dez/2023.
- 3 - Jardim, S.B.; "Sistemas de Bombeamento", Sagra-DC Luzzatto, Porto Alegre, 1992.
- 4 - Moura, L.F.; "Excel para engenheiros", EdUFSCar, São Carlos, 2007.
- 5 - Porto, R.M.; "Hidráulica Básica", EESC-USP, São Carlos, 2004.
- 6 - Streeter, B.L. & Wylie, E.B.; "Fluid Mechanics", 8th Edition, McGraw-Hill, NY, 1985.
- 7 - Swamee, P.K. & Jain, A.K.; "Explicit Equations for Pipe-Flow Problems", Journal of the Hyd. Division, ASCE, p. 657-664, May, 1976.

LC, Vitória, Dez/2023.

## Apêndice:

Curva característica da bomba do problema resolvido neste texto.

