

ANÁLISE DO PARÂMETRO "K" DA FÓRMULA DE BRESSE, EM FUNÇÃO DAS VARIÁVEIS QUE INFLUENCIAM O DIMENSIONAMENTO ECONÔMICO DE ESTAÇÕES DE RECALQUE

Saulo de Tarso Marques Bezerra¹; Heber Pimentel Gomes²; João Silvino Oliveira Paiva da Silva³; Daniela da Silva Santos³

Resumo - Apresenta-se, neste trabalho, uma análise do coeficiente K da fórmula de Bresse de dimensionamento econômico de tubulações de recalque. A metodologia de dimensionamento ótimo de instalações de recalque, baseado na variação linear dos custos das tubulações, foi utilizada como método comparativo. O estudo foi feito com base em seis estudos de caso citados na literatura. Os resultados obtidos mostraram que os valores encontrados para o coeficiente K estão compreendidos entre 1,0 e 1,3. Estes valores diferem dos limites indicados na literatura, que são de 0,7 e 1,5. A maior influência do custo energético, em comparação com os custo das tubulações, dos seis estudos de caso analisados, justificam a diferença entre os limites de K determinados nos exemplos e os citados na literatura.

Palavras chaves: Fórmula de Bresse, dimensionamento econômico, instalações de recalque.

Abstract - This work presents an analysis of the K coefficient in Bresse's formula for economic dimensioning of pumping pipelines. The methodology for optimal dimensioning of pumping pipelines based on linear variation of pipelines costs was used as a comparative method. The study was based on six other studies found in academic papers. The results obtained from the study show values between 1,0 and 1,3 for K coefficient. These values appear to be different from the ones found in literature, whose limits were between 0,7 and 1,5. The major influence on energetic costs, compared to pipeline costs of the six analyzed cases, justifies the difference between the limits of K determined in the examples from the ones found in literature.

Keywords: Bresse's formula, economic dimensioning, pumping pipeline

¹ Doutorando do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento, CT/UFPB. CEP 58050-900, João Pessoa, Brasil. E-mail: saulo@lrh.ct.ufpb.br.

² Professor do Departamento de Engenharia Civil, Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento, Centro de Tecnologia /UFPB. CEP 58050-900, João Pessoa, PB, Brasil. E-mail: heber@lrh.ct.ufpb.br.

³ Alunos da graduação de Engenharia Civil, Bolsistas do programa PIBIC/CNPq/UFPB.

INTRODUÇÃO

As instalações de recalque ou estações elevatórias são sistemas compostos por bombas e tubulações, utilizados para pressurizar um determinado líquido, a fim de conduzi-lo a um ou vários pontos de consumo, superando desníveis topográficos e perdas de carga ao longo das canalizações. Estas instalações são usadas, principalmente, nos sistemas de abastecimento urbano de água, em projetos de irrigação, em estações elevatórias de esgotos, em instalações prediais, etc. As instalações são compostas, principalmente, por uma estação de bombeamento, incluindo o sistema de sucção e uma tubulação de recalque, que pode alcançar, dependendo do projeto, dezenas de quilômetros de comprimento.

O projeto de uma instalação de recalque abrange o dimensionamento das tubulações de recalque e de sucção, com o conseqüente cálculo da potência do conjunto elevatório. O projeto, sob o ponto de vista técnico e econômico, está condicionado, primordialmente, ao dimensionamento hidráulico da tubulação de recalque, já que esta constitui, na grande maioria dos projetos, no componente mais importante pela sua magnitude econômica, em comparação com o sistema de sucção e bombeamento. Conforme o diâmetro encontrado para a adutora, os custos de implantação e de operação do sistema poderão variar, obtendo-se assim projetos mais ou menos onerosos.

O dimensionamento de um conduto de recalque é um problema hidraulicamente indeterminado, pois há mais incógnitas do que equações disponíveis, podendo haver inúmeras soluções para o diâmetro (e para a velocidade) que atendem à vazão demandada. Essa indeterminação pode ser superada admitindo-se uma restrição hidráulica ao problema, que pode ser uma perda de carga máxima admissível no conduto, uma velocidade recomendada de escoamento, ou então, admitindo-se um diâmetro já normalizado, dentre os comercialmente disponíveis. No entanto, a metodologia mais adequada para resolver esse problema constitui-se na introdução do critério econômico de se obter a alternativa de projeto que minimize o custo total do sistema, composto pelo de implantação e o de operação.

Os custos de implantação e de operação são antagônicos, ou seja, quando um aumenta o outro diminui e vice-versa. Ao se escolher um diâmetro menor para a adutora, haverá uma diminuição no seu custo de implantação, mas, em contrapartida, o custo de operação (energético) será maior. De modo oposto, ao se optar por um diâmetro maior, haverá uma diminuição no custo de operação, devido a diminuição das perdas de carga, e um conseqüente aumento no custo de implantação da tubulação de recalque. Para uma mesma vazão há uma considerável diminuição da perda de carga quando se aumenta o diâmetro da tubulação de recalque, pois esta varia com o inverso da quinta potência do diâmetro, barateando assim, a energia que será gasta no decorrer da utilização da instalação. De maneira oposta, quando ocorre um aumento do diâmetro utilizado, aumentar-se-á o custo total de investimento da tubulação, pois quanto maior o diâmetro de um tubo, constituído por um mesmo material e de uma mesma classe, maior será o custo da implantação. Assim sendo, faz-se necessário determinar um diâmetro ótimo para a tubulação de recalque, de tal forma que se obtenha, para uma vazão determinada, o menor custo do sistema, composto este pela soma do custo de implantação, e o de operação. O maior peso deste último corresponde ao gasto de energia elétrica. O custo de implantação abrange a soma do custo dos tubos, das peças de conexão, do conjunto motor-bomba, e as despesas com escavação e montagem.

Há, na literatura, vários métodos desenvolvidos para se calcular o diâmetro economicamente ideal para a tubulação de uma estação elevatória (CAMP, 1952; CUOMO e

VILLELA, 1961; DEB, 1978, COIADO e RIVELLI, 1993; GOMES, 2001; ZOCOLER et al, 2004). Uma das primeiras fórmulas da hidráulica para o dimensionamento econômico de tubulações de recalque, que ainda, é comumente usada pelos engenheiros hidráulicos, é a de Bresse⁴, na qual o diâmetro ótimo da tubulação de recalque está relacionado à vazão requerida do sistema através de um coeficiente “K”.

Comumente, a adoção da fórmula de Bresse equivale à fixação de uma velocidade, que seria a mais recomendada em termos de economia e segurança do sistema. Porém, o critério de dimensionamento desenvolvido por Bresse é passível a incertezas, uma vez que o coeficiente “K” é função de diversos fatores e tem que ser arbitrado conforme a experiência do projetista, o que tornar esse método vulnerável à obtenção do diâmetro econômico.

Neste trabalho será analisado o comportamento do coeficiente de Bresse em relação aos parâmetros envolvidos no método econômico *fundamentado na variação linear dos custos das tubulações*, verificando, assim, a confiabilidade do uso da fórmula de Bresse sob a ótica da otimização econômica.

METODOLOGIA

Existem na literatura vários métodos desenvolvidos para se calcular o diâmetro economicamente ideal para condutos, a mais utilizada para o pré-dimensionamento econômico de tubulações de recalque, é a de Bresse:

$$D = K \times \sqrt{Q} \quad (1)$$

Onde D é o diâmetro interno da tubulação, em m; Q é a vazão, em m³/s; e K é o coeficiente de Bresse.

A fórmula de Bresse foi desenvolvida para um funcionamento ininterrupto, durante as 24 horas do dia. Para o funcionamento da estação elevatório durante um número “X” de horas diárias a norma técnica NBR-5626 da ABNT (1998) recomenda a equação:

$$D = 1,3\sqrt[4]{X} \sqrt{Q} \quad (2)$$

Com o advento de novas ferramentas metodológicas, principalmente nas áreas de pesquisa operacional, têm-se desenvolvidos critérios mais precisos de dimensionamento de sistemas de recalque, dentre os quais, pode-se destacar o método baseado na variação linear dos custos das tubulações (GOMES, 2001).

⁴ Jaques Antoine Charles Bresse, engenheiro francês, civil e hidráulico, professor de matemática, nascido em 1822, em Vienne, Isère; foi quem primeiro integrou analiticamente equações para movimentos gradualmente variados. Estudou na Escola Politécnica de Paris e na École des Ponts et Chaussées, tendo posteriormente entrado para o seu quadro sucedendo Belanger como professor de Matemática. Iniciou-se na pesquisa no campo da elasticidade, mas sua primeira publicação notável foi Cours de mécanique appliquée, que continha formulações precisas sobre ressaltos hidráulicos e movimentos gradualmente variados. Posteriormente, criou a famosa fórmula de Bresse, para o dimensionamento econômico de tubulações de recalque, uma das primeiras fórmulas da hidráulica, que, ainda hoje, é amplamente utilizada. Eleito, em 9 de outubro de 1880, membro da seção de mecânica da Académie des Sciences. Jaques Bresse faleceu no dia 22 de maio de 1883 em Paris, na França.

MÉTODO BASEADO NA VARIAÇÃO LINEAR DOS CUSTOS DAS TUBULAÇÕES

O método é bastante simples e parte do princípio, admitido por MENDILUCE (1966), de que o custo da tubulação varia linearmente com o seu diâmetro, ou seja:

$$C(D) = \lambda D \quad (3)$$

Onde $C(D)$ é o preço da tubulação por metro de comprimento (\$/m); D o diâmetro normalizado do tubo, em metros; e λ é o custo do tubo, por metro de comprimento, e por metro de diâmetro (\$/m/m).

O custo total do sistema de recalque é composto de duas partes distintas: uma referente aos custos de implantação do sistema, e a outra se refere aos custos operacionais, que, em grande parte, corresponde à energia gasta pela instalação de bombeamento para recalcar a vazão requerida pelo sistema.

O custo de implantação da tubulação de recalque pode ser dado pela equação 4, sendo L o comprimento total da tubulação, ou seja:

$$C_{\text{instalação}} = \lambda D L \quad (4)$$

A potência, em kW, requerida pelo conjunto motor bomba, para elevar uma vazão Q de água, a uma determinada altura manométrica “ H_{man} ” é dada por:

$$P = \frac{8,91 Q H_{\text{man}}}{\eta} \quad (5)$$

O custo anual com energia é obtido mediante o produto da potência requerida, pelo número anual de horas de bombeamento e pelo custo unitário da energia, ou seja:

$$C_{\text{energia}} = \frac{9,81 Q (H_g + h_f) n_b p}{\eta} \quad (6)$$

Onde n_b é o número anual de horas de bombeamento; p é o preço do kWh; e h_f corresponde às perdas de carga totais na instalação, que podem ser expressas, segundo a equação universal, para escoamento turbulento, por:

$$h_f = \beta L \frac{Q^2}{D^5} \quad (7)$$

Onde a variável de perdas “ β ”, segundo Darcy-Weisbach, é igual a:

$$\beta = \frac{8}{\pi^2 g} \left(f + \frac{(\Sigma k) D}{L} \right) \quad (8)$$

Onde f é o coeficiente de atrito do tubo; Σk o somatório dos coeficientes de perdas localizadas; Q é a vazão em m^3/s ; L é o comprimento da tubulação, em m; e D o diâmetro interno da tubulação, em m.

O coeficiente de atrito “ f ” pode ser obtido através da fórmula de COLEBROOK e

WHITE (1938), para regime de escoamento turbulento:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left(\frac{\varepsilon/D}{3,7} + \frac{2,51}{Re \sqrt{f}} \right) \quad (9)$$

Onde Re é o número de Reynolds e “ ε/D ” é a rugosidade relativa do tubo.

Os custos de implantação e de operação da instalação incidem em tempos distintos, já que o custo de implantação é fixo e atua no início do empreendimento, enquanto que o custo energético incide ao longo da vida útil do projeto. Nesse caso, para que se possa somar os dois custos, deve-se amortizar o custo atual de implantação e adicionar ao custo anual de energia, ou calcular o valor presente (atualizado) do custo energético, adicionando-o, posteriormente, ao custo fixo de implantação. Essa última alternativa foi a utilizada neste trabalho.

O custo atualizado da energia é dado pelo produto entre o custo energético anual e o coeficiente de atualização da energia “ F_a ”, expresso por (GOMES, 2004):

$$F_a = \frac{(1+e)^n - (1+i)^n}{(1+e) - (1+i)} \times \frac{1}{(1+i)^n} \quad (10)$$

Onde “ i ” é a taxa de juros anual; “ e ” é taxa de aumento anual da energia; e “ n ” é o período de amortização (em anos), que normalmente considera-se como sendo igual à vida útil da instalação.

Assim, o custo total do sistema de recalque (de implantação e de operação) pode ser expresso da seguinte forma:

$$C_{\text{total}} = \frac{9,81 Q \left(H_g + \beta L \frac{Q^2}{D^5} \right) n_b p}{\eta} \times F_a + \lambda D L \quad (11)$$

O custo do sistema de recalque será mínimo quanto a tangente à curva que representa o custo total, for igual a zero. Logo, o diâmetro mínimo (ótimo teórico) será:

$$D_{\text{ótimo}} = 1,913 \left(\frac{\beta p n_b F_a}{\lambda \eta} \right)^{0,166} \sqrt{Q} \quad (12)$$

Na determinação do valor de “ λ ” da equação 4 devem ser computados, além do preço unitário do tubo, incluindo transporte e impostos, os gastos com a escavação e montagem. O parâmetro de custo “ λ ” e a variável de perda “ β ” variam com o diâmetro da tubulação, o que poderia, a princípio, dificultar o cálculo do diâmetro ótimo através da equação 12. No entanto, esse aspecto não se constitui em um problema para a obtenção do diâmetro ótimo, já que, para qualquer valor de “ λ ” e “ β ”, obtidos a partir de um determinado diâmetro, entre os comercialmente disponíveis, o valor de $D_{\text{ótimo}}$ se situará em torno de um diâmetro nominal, que será o ótimo definitivo para o projeto.

A fim de verificar o comportamento do coeficiente de Bresse “ K ”, será feita uma analogia entre a equação 12 (*método baseado na variação linear dos custos das tubulações*)

com a fórmula de Bresse (eq. 1), através dos quais obteremos o coeficiente K em função de “β”, “p”, “n_b”, “Fa”, “λ” e “η”; logo, o valor de K é:

$$K = 1,913 \left(\frac{\beta p n_b F_a}{\lambda \eta} \right)^{0,166} \quad (13)$$

Pode-se acrescentar, portanto, que o coeficiente “K” depende das perdas de carga na adutora, do custo energético, do número de horas de bombeamento, da duração da vida útil do projeto, da taxa de juros anual, da taxa de aumento da energia, do custo de implantação da tubulação e do rendimento do conjunto elevatório, confirmando a grande incerteza ao se tentar atribuir diretamente um valor para o K.

Para se analisar o comportamento de K em relação às várias possibilidades de operação e implantação de instalações de recalque, comparou-se o dimensionamento de elevatórias através da fórmula de Bresse, variando-se o valor de K segundo a equação 13. A análise comparativa foi realizada através de seis estudos de caso citados na literatura: cinco em GOMES (2004) e um em PORTO (1998). Para cada estudo de caso, variou-se cada um dos parâmetros da equação 13 para verificar a correspondente variação de K.

A Tabela 1 apresenta as faixas de variação dos valores dos parâmetros da equação 13, enquanto que na Tabela 2 encontram-se as faixas de valores de K indicadas na literatura.

Tabela 1 - Faixa de variação dos parâmetros da equação 12

Parâmetro	Unidade	Variação
Variável de perdas “β”	adimensional	1,0 x 10 ⁻³ - 5,0 x 10 ⁻³
Preço do kWh “p”	\$ (unidade monetária)	0,06 - 0,30
Utilização média diária “n _b ”	horas	6 – 24
Taxa de juro anual “i”	%	3 – 20
Taxa de aumento anual de energia “e”	%	0 – 15
Período de utilização “n”	anos	5 – 30
Parâmetro de custo “λ”	\$/m/m	250 - 1.000
Rendimento do conjunto motor-bomba “η”	%	50 – 85

Tabela 2 - Velocidades indicadas na literatura e correspondentes valores de K

Autor	Velocidade (m/s)	Coef. de Bresse “K”
CETESB (1976)	0,88	1,20
SILVESTRE (1979)	0,65 - 2,26	0,75 - 1,40
GARCÍA (1993)	0,57	1,5
AZEVEDO NETTO (1998)	0,57 - 2,60	0,70 - 1,50
PORTO (1998)	0,75 - 2,61	0,70 - 1,30
MUÑOZ (2000)	0,57	1,5
TSUTYIA (2004)	1,00 - 1,50	0,92 - 1,13
ZOCOLER et al (2004)	0,75 - 2,61	0,70 - 1,30

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na tabela 3 encontram-se os valores dos dados de entrada dos seis estudos de caso analisados neste trabalho, enquanto a tabela 4 apresenta os correspondentes resultados dos dimensionamentos otimizados, obtidos pelo método da variação linear dos custos das tubulações (equação 12).

Tabela 3 - Dados de entrada dos exemplos de GOMES (2004)

Dados	Unidade	Quantidade					
		Ex. 1	Ex. 2	Ex. 3	Ex. 4	Ex. 5	Ex. 6
Altura geométrica	m	30	82	67,2	74	82	48
Comprimento da tubulação	m	2.000	24.190	1.096	84	24.190	880
Vazão requerida	l/s	40	315	3,50	11,19	275,63	80
Somatório dos coef. (perdas localizadas)	-	15	0	0	15	0	0
Rendimento do conjunto motor-bomba	%	75	85	60	70	78	60
Viscosidade cinemática da água	m ² /s			0,000001	004		
Rugosidade absoluta	Mm	0,02	0,10	0,02	0,02	0,10	0,4
Período de utilização	Anos	30	30	20	20	30	20
Utilização média anual	Horas	5.840	6.570	5.110	6.570	8.760	5.840
Preço do kWh	R\$	0,063	0,189	0,073	0,230	0,227	0,189
Taxa de aumento anual de energia	%	6	6	9	8	6	0
Taxa de juro anual	%	12	12	12	12	12	12

Tabela 4 - Variáveis calculadas para cada exemplo

Dados	Unidade	Quantidade					
		Ex. 1	Ex. 2	Ex. 3	Ex. 4	Ex. 5	Ex. 6
Coef. de atualização da energia	-	13,47	13,47	13,97	12,92	13,47	7,47
Parâmetro de custo “ λ ”	R\$/m/m	247,44	1.063,78	276,91	429,09	1.063,78	797,49
Variável de perdas “ β ”	-	0,00138	0,00134	0,00181	0,00465	0,00135	0,00196
Velocidade de escoamento	m/s	1,22	1,04	0,84	0,58	0,91	1,03
Diâmetro ótimo comercial	mm	200	600	75	150	600	300

Os gráficos da variação de cada parâmetro da equação 13 para os cinco estudos de caso estão apresentados na figura 1, enquanto que na Tabela 5 encontram-se os dados sintetizados, necessários para a análise do coeficiente K. São apresentados, na tabela 5 (colunas B e C), os valores mínimos e máximos dos diâmetros nominais, para cada estudo de caso, calculados a partir da fórmula de Bresse, com $K_{\min}$ e $K_{\max}$ iguais, respectivamente, a 0,7 e 1,5. A Tabela 5 mostra, também, os valores mínimos e máximos de K (colunas F e H), obtidos em função, respectivamente, dos valores mínimos e máximos, dos parâmetros da equação 13, extraídos da Tabela 1, para cada estudo de caso considerado. Na coluna J, da mesma tabela, encontram-se os valores das amplitudes de K, correspondentes as diferença entre os máximos e mínimos

estabelecidos nas colunas F e H, respectivamente. Nas quatro últimas colunas são fornecidos os valores de K e do DN, determinados, respectivamente, segundo o método da variação linear dos custos da tubulação (equação 12) e a fórmula estabelecida pela ABNT (equação 2). A tabela 6 mostra as amplitudes médias de cada parâmetros da eq. 13 (“ β ”, “p”, “ n_b ”, “i”, “e”, “n”, “ λ ” e “ η ”).

Os resultados obtidos, mostrados nos gráficos da figura 1 e nos valores da Tabela 5, demonstram que os valores encontrados para o coeficiente K encontram-se dentro dos limites citados na literatura (entre 0,7 e 1,5). No entanto, observa-se que, com base nos seis estudos de caso analisados neste trabalho, os valores determinados de K, mínimos e máximos, foram, em média, iguais a 1,058 e 1,321, respectivamente. A amplitude média correspondente foi de 0,264. A amplitude do valor de K, entre 1,06 e 1,35, encontrada nos seis exemplos estudados, demonstra que houve uma diminuição na faixa de velocidade das soluções dos diâmetros econômicos das tubulações de recalque, em comparação à amplitude citada normalmente na literatura (Tabela 2). Esta mudança é resultado de uma maior repercussão do custo energético do bombeamento frente ao custo de implantação da adutora de recalque.

A influência de cada parâmetro da equação 13 no valor de K dependerá dos valores máximos e mínimos admitidos, conforme os dados estabelecidos na Tabela 1. Pelos dados da Tabela 5 observa-se que o parâmetro que menos influenciou no valor de K foi o referente ao rendimento do conjunto motor-bomba “ β ”, cuja amplitude média de K foi igual a 0,108 (ver Tabela 6). Isto era de se esperar já que, de acordo com os dados da Tabela 1, o intervalo de variação do rendimento foi de 50 a 85%, enquanto que nos demais parâmetros (“p”, “ n_b ”, “i”, “e”, “n”, & “ λ ”) os valores máximos admitido foram superiores a quatro vezes os valores mínimos.

Pelos dados da Tabela 5 observa-se que, em quatro dos seis estudos de caso analisados, os diâmetros nominais DN, determinados pela equação da ABNT, não coincidem com os diâmetros ótimos calculados pelo método da variação linear dos custos das tubulações.

CONCLUSÃO

Com os resultados obtidos, nos seis estudos de caso analisados, pôde-se comprovar que o coeficiente K da fórmula de Bresse se situou entre os valores de 1,0 e 1,3, diferindo do intervalo citado, normalmente, na literatura (entre 0,7 e 1,5). Isto demonstra que nos seis estudos de caso analisados, a repercussão do custo de operação das elevatórias, representada pelo custo da energia, é bastante representativa, em comparação ao custo de investimento das tubulações, conduzindo a adutoras com menores velocidades e maiores diâmetros ótimos, e conseqüentemente maiores valores de K.

Observou-se, também, que os diâmetros econômicos determinados pela equação recomendada pela ABNT (1998) não coincidem com os determinados pelo método da variação linear dos custos das tubulações.

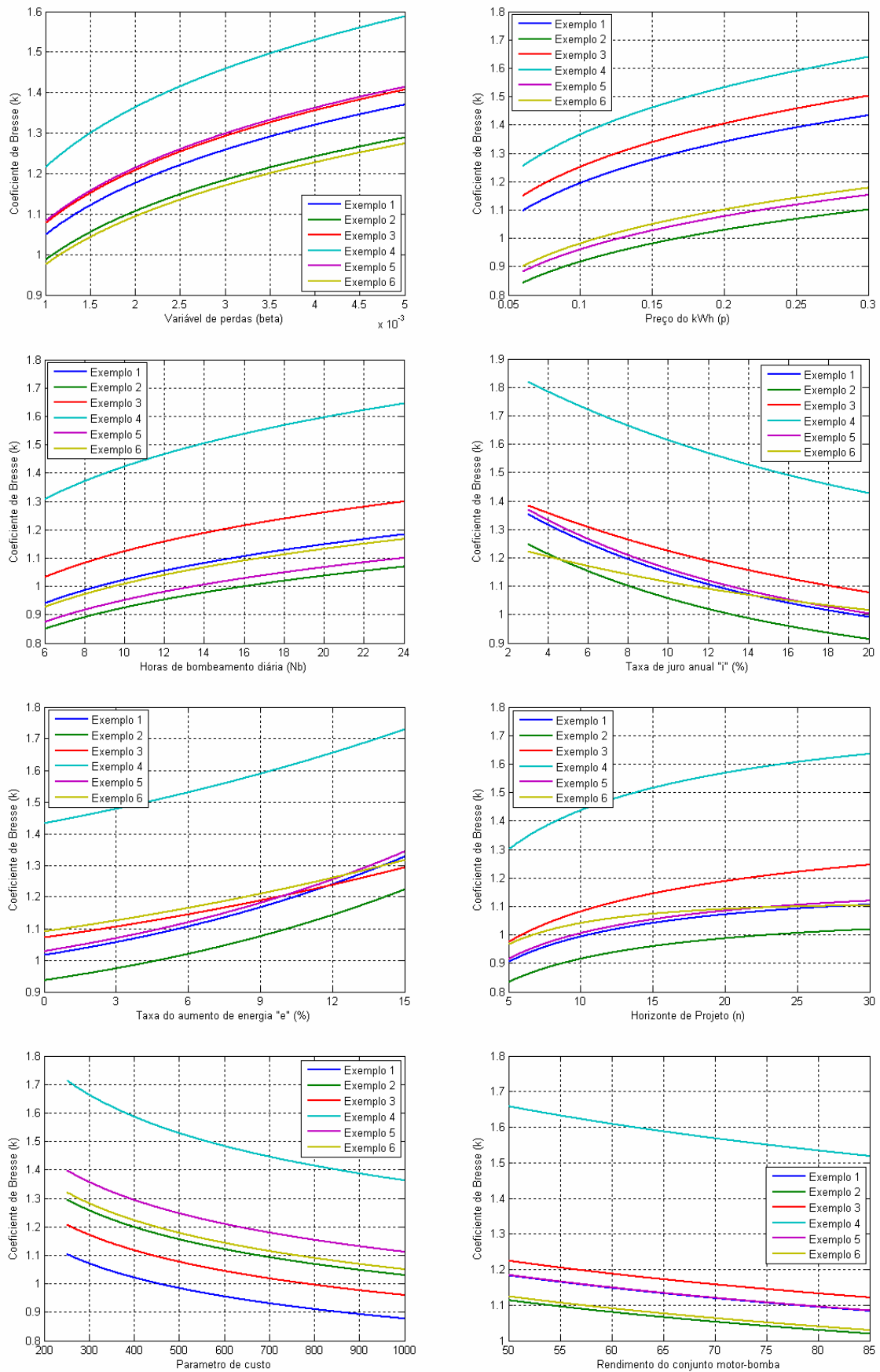


Figura 1 - Variação do coeficiente K versus " β ", " p ", " n_b ", " i ", " e ", " n ", " λ " e " η " para os cinco estudos de caso considerados

Tabela 5 - Análise do coeficiente K

A1	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
2	Exemplos	DN calculados pela eq. de Bresse (K = 0,70 a 1,50)		Variáveis	Valores calculados com base no método da variação linear dos custos das tubulações (GOMES, 2001)					Real valor de "K" para o exemplo	DN comercial ótimo p/ o exemplo	Valor de "K" p/ ABNT	DN comercial ótimo p/ ABNT	
3		DN (mín.)	DN (máx.)		K (mín.)	DN (mín.)	K (máx.)	DN (máx.)	Amplitude do K					
4	1	150	300	β	1,048	200	1,370	250	0,321	1,021	200	1,175	250	
5				p	1,097	200	1,433	300	0,336					
6				n _b	0,940	200	1,183	250	0,243					
7				Fa	i	0,991	200	1,354	250					0,362
8					e	1,015	200	1,327	250					0,311
9					n	0,904	200	1,106	200					0,201
10				λ	0,877	150	1,104	200	0,227					
11				η	1,083	200	1,183	250	0,100					
12	2	400	900	β	0,986	500	1,289	700	0,302	1,104	600	1,210	700	
13				p	0,842	450	1,100	600	0,258					
14				n _b	0,849	450	1,068	600	0,220					
15				Fa	i	0,913	500	1,247	700					0,334
16					e	0,935	500	1,222	700					0,287
17					n	0,833	450	1,019	600					0,186
18				λ	1,029	600	1,295	700	0,266					
19				η	1,019	600	1,112	600	0,094					
20	3	50	100	β	1,077	50	1,407	75	0,330	1,231	75	1,136	75	
21				p	1,150	75	1,502	100	0,352					
22				n _b	1,032	50	1,299	75	0,267					
23				Fa	i	1,078	75	1,384	75					0,306
24					e	1,071	75	1,293	75					0,222
25					n	0,974	50	1,246	75					0,271
26				λ	0,960	50	1,208	75	0,248					
27				η	1,121	75	1,225	75	0,103					
28	4	75	150	β	1,215	150	1,587	150	0,372	1,479	150	1,210	100	
29				p	1,255	150	1,639	150	0,384					
30				n _b	1,307	150	1,645	150	0,338					
31				Fa	i	1,427	150	1,820	200					0,392
32					e	1,432	150	1,729	200					0,297
33					n	1,299	150	1,635	150					0,336
34				λ	1,363	150	1,716	150	0,353					
35				η	1,519	150	1,659	150	0,140					
36	5	400	800	β	1,082	500	1,413	700	0,331	1,180	600	1,300	700	
37				p	0,912	450	1,192	600	0,279					
38				n _b	0,904	450	1,138	600	0,234					
39				Fa	i	1,020	500	1,393	700					0,373
40					e	1,045	500	1,365	700					0,320
41					n	0,930	450	1,138	600					0,207
42				λ	1,149	600	1,447	700	0,297					
43				η	1,122	600	1,225	600	0,103					
44	6	200	400	β	0,975	250	1,273	350	0,299	1,112	300	1,175	300	
45				p	0,901	250	1,177	350	0,276					
46				n _b	0,927	250	1,166	350	0,240					
47				Fa	i	1,016	250	1,223	350					0,207
48					e	1,090	250	1,316	350					0,226
49					n	0,966	250	1,104	300					0,138
50				λ	1,050	300	1,322	400	0,272					
51				η	1,029	300	1,124	300	0,095					
					1,058		1,321		0,264					

Tabela 6 - Amplitude média dos valores de K em função da variação máxima dos parâmetros β , “p”, “ n_b ”, “i”, “e”, “n”, “ λ ” e “ η ” para os cinco estudos de caso considerados neste trabalho

	Exemplo 1	Exemplo 2	Exemplo 3	Exemplo 4	Exemplo 5	Exemplo 6	MÉDIA
β	0,321	0,302	0,330	0,372	0,331	0,299	0,331
p	0,336	0,258	0,352	0,384	0,279	0,276	0,322
n_b	0,243	0,220	0,267	0,338	0,234	0,240	0,260
Fa	i	0,362	0,334	0,306	0,392	0,373	0,354
	e	0,311	0,287	0,222	0,297	0,320	0,287
	n	0,201	0,186	0,271	0,336	0,207	0,240
λ	0,227	0,266	0,248	0,353	0,297	0,272	0,278
η	0,100	0,094	0,103	0,140	0,103	0,095	0,108

REFERÊNCIAS

- [ABNT] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5626: *Instalações prediais de água fria*. Rio de Janeiro, setembro 1998.
- AZEVEDO NETTO, J.M.; FERNANDEZ, M.F.; ARAUJO, R.; ITO, A.E. (1998) “*Manual de Hidráulica*”, Editora Edgard Blücher Ltda. 8ª Edição. São Paulo, 1998. 669p.
- CAMP, T.R. (1952) “*Water distribution*”, In: DAVIS, C.V. Handbook of applied hydraulics. New York: McGraw-Hill, 1952. cap.20, p.881-944.
- COIADO, E.M.; A. RIVELLI JUNIOR., A. (1993) “*Influência da evolução do custo da energia elétrica no diâmetro econômico de uma instalação de recalque de água de abastecimento*”, Revista Brasileira de Engenharia - Caderno de Recursos Hídricos, v.11, n.2, p.27-48, dez. 1993.
- CUOMO, A.R.; VILLELA, S.M. (1961) “*Dimensionamento econômico de tubulações em recalque*” São Carlos: EESC, 1961.
- DEB, A.K. (1978) “*Optimization in design of pumping systems*”, Journal of the environmental engineering division, ASCE, v.104, n.EE1, p.127-136, 1978.
- GOMES, H.P. (2001) “*Dimensionamento econômico de instalações de recalque*”, Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental. Rio de Janeiro, v.6, n.4, p.108-114, 2001.
- GOMES, H.P. (2004) “*Sistemas de abastecimento de água: dimensionamento econômico e operação de redes elevatórias*”, Editora Universitária da UFPB. 2ª Edição. João Pessoa, 2004. 242p.
- MENDILUCE, E. (1966) “*Cálculo de las tuberías de impulsión*”, Revista de Obras Públicas. Madrid, enero, 1966.
- MUÑOZ, A.H. (2000) “*Abastecimiento y Distribución de Agua*”, Madrid: Servicio de Publicación de la Escuela de Ingenieros de Caminos de Madrid. Colección Senior. 4ª ed. Madrid, 2000.

- PORTO, R. M. (1998) “*Hidráulica Básica*” São Carlos: Publicação EESC-USP, 1998, 519 p.
- SILVESTRE, P. (1979) “*Hidráulica Geral*” Livros Técnicos e Científicos. Rio de Janeiro, 1979. 316p.
- TSUTYIA, M.T. (2004) “*Abastecimento de Água*”, Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2004. 634p
- ZOCOLER, J.L.; OLIVEIRA, L.A.F.; BAGGIO FILHO, F.C.; HERNANDEZ, F.B.T. (2004) “*Modelo para Determinação do Diâmetro e Velocidade de Escoamento Econômica em Sistemas Elevatórios de Água*”, In: Anais do 3º Congresso Temático de Dinâmica e Controle da SBMAC. 2004.