

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

FACULDADE DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS E AGRÍCOLA

"DETERMINAÇÃO DO DIÂMETRO ECONÔMICO
PARA TUBOS DE CONDUÇÃO"

MARIA ANGELA DE ALMEIDA MEIRELES PETENATE

Orientador: Prof. Dr. Herbert G. Wirth

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia de Alimentos e Agrícola da Universidade Estadual de Campinas, para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Alimentos.

Julho, 1979.

pelo carinho e apoio,

dedicada à:

ADEMIR JOSÉ

AGRADECIMENTOS

Aos que colaboraram direta ou indiretamente para a execução deste trabalho.

Em particular:

Aos professores: Wirth, Florencia e Theo.

Aos funcionários: Maria José e Wilson.

À PERSICO PIZZAMIGLIO S/A Indústria e Comércio, na pessoa do Sr. Amin Luiz Lottfi.

À AÇOS INAFER S/A.

RESUMO

Verificamos os modelos propostos na literatura para a equação de custo fixo de tubos de condução, e adaptamos um deles às condições brasileiras.

Determinamos a equação para tubos de aço carbono (EB.182 leve, EB.182 médio, ASTM A.120 Sch.40), e tubos de aço inoxidável (Sch. 10:316L,304L; Sch.40:316L,304L; Sch.80:316L,304L; ISO-R-65:316,304).

A influência do tempo (ou economia inflacionária) sobre o modelo foi analisada, utilizando análise de regressão.

Estabelecemos, para os tubos mencionados acima, equações para a determinação do diâmetro econômico, para escoamentos laminar e turbulento. As soluções para escoamento turbulento foram obtidas pelo uso de uma correlação aproximada para o fator de fricção (para tubos - hidraulicamente lisos). Os resultados foram comparados com os obtidos pelo uso da equação de Colebrook, no caso de escoamento turbulento de água.

Determinamos a taxa de fluxo crítica baseada nas equações obtidas.

Os resultados foram apresentados como equações e em forma gráfica.

SUMMARY

The literature models of capital costs for piping were tested, adapting one of them to Brazilian conditions.

Equations for carbon steel piping (light, medium E.B.182; ASTM-A.120 Sch 40) and stainless piping (Sch 10 : 316L, 304L; Sch 40 : 316L, 304L; Sch 80 : 316L, 304L; ISO-R-65 : 316, 304) were established.

The influence of time (inflationary conditions) on the model was analyzed by regression analysis.

Economic (optimum) diameter equations in laminar and turbulent flow were developed for those piping. The solutions for turbulent flow were obtained by applying an approximate frictions factor correlation. The results were compared to those obtained through Colebrook's equation in the case of turbulent flow of water.

Critical flow rate were determined based on our equations.

Results are presented both as equations and charts.

<i>CAPÍTULO 4 - Resultados</i>	<i>PAG.</i>
<i>4.1 - equações para custo fixo</i>	<i>70</i>
<i>4.2 - equações para custo anual fixo</i>	<i>102</i>
<i>4.3 - custo anual total e equação para otimização eco- nômica</i>	
<i>4.3.1 - escoamento laminar</i>	<i>104</i>
<i>4.3.2 - escoamento turbulento</i>	
<i>4.3.2.1 - soluções obtidas para um f aproximado ..</i>	<i>106</i>
<i>4.3.2.2 - soluções obtidas usando Colebrook</i>	<i>109</i>
<i>4.4 - critério para determinação do regime de escoamen- to</i>	<i>110</i>
<i>4.5 - relação econômica ótima entre custo fixo e variá- vel</i>	<i>111</i>
<i>4.6 - escoamento turbulento - comparação entre os diâ- metros econômicos</i>	<i>114</i>
<i>nomemclatura</i>	<i>123</i>
 <i>CAPÍTULO 5 - Conclusões e Sugestões</i>	
<i>5.1 - o modelo ajustado para equação de custo fixo</i>	<i>125</i>
<i>5.2 - custo anual fixo</i>	<i>127</i>
<i>5.3 - equações para otimização econômica</i>	<i>127</i>
<i>5.4 - conclusões e sugestões</i>	<i>129</i>
<i>REFERÊNCIAS</i>	<i>132</i>
<i>APÊNDICE</i>	

INDICE DE FIGURAS

PAG.

1.1 - princípios de um dimensionamento econômico	2
2.1 - escoamento de fluidos num tubo de correntes	8
2.2 - diâmetro econômico - [12]	10
2.3 - diâmetro econômico - [24]	20
2.4 - diâmetro econômico - [26]	28
2.5 - diâmetro econômico - [18]	30
2.6 - diâmetro econômico - [19]	31
2.7 - diâmetro econômico - solução exata [21]	33
2.8 - diâmetro econômico - solução aproximada - [21]	33
3.1 - relações custo - diâmetro - análise preliminar ...	53
3.2 - gráfico de resíduos - esperado	60
4.1 - reta estimada $j=1$	78
4.2 - reta estimada $j=2$	78
4.3 - reta estimada $j=3$	79
4.4 - reta estimada $j=4$	79
4.5 - reta estimada $j=5$	80
4.6 - reta estimada $j=6$	80
4.7 - análise de resíduos $j=1$	84
4.8 - análise de resíduos $j=2$	84
4.9 - análise de resíduos $j=3$	85
4.10- análise de resíduos $j=4$	85
4.11- análise de resíduos $j=5$	86

4.12 - análise de resíduos $j=6$	86
4.13 - reta estimada $j=3$	100
4.14 - reta estimada $j=9$	100
4.15 - diâmetro econômico - escoamento laminar (Eq.4.51) .	115
4.16 - diâmetro econômico - escoamento laminar (eq.4.56) .	116
4.17 - diâmetro econômico - escoamento turbulento (qq.4.63)	117
4.18 - diâmetro econômico - escoamento turbulento (eq.4.68)	118
4.19 - diâmetro econômico - escoamento de água (usando Colebrook) ($j=3$)	119
4.20 - diâmetro econômico - escoamento de água (usando Colebrook) ($j=5$)	120
4.21 - taxa de fluxo crítica (eq.4.72)	121
4.22 - taxa de fluxo crítica (eq.4.77)	122

INDICE DE TABELAS

2.1 - velocidades quando diâmetro do tubo é ótimo	23
2.2 - valores empregados para a obtenção das equações (2.32b), (2.32b'), (2.31d) e (2.32d')	26
2.3 - valores empregados para obter a equação (2.33a) .	26
2.4 - comparação entre diâmetros econômico estimados pelas equações (2.31d') e (2.33a')	27
2.5 - valores considerados para obtenção da equação (2.35a) .	27

2.6 - fatores empregados na construção das figuras 2.5 e 2.6	29
2.7 - valores das variáveis usadas por Pipe and Pipelines	34
2.8 - comparação entre os diâmetros econômicos obtidos pelos diagramas dos diferentes autores	36
3.1 - preços de tubos de condução em fevereiro 1979 (CR\$/kg)	46
3.2 - índices de reajustes para tubos de condução autorizados pelo C.I.P.	47
3.3 - preços de tubo de aço inoxidável sem costura, em março 1979 (CR\$/m)	48
3.4 - preços de tubos de condução em CR\$/m de fevereiro de 1979	49
3.5 - diâmetros internos de tubos de condução	50
4.1 - resultados da aplicação dos mínimos quadrados aos pares (X_i, Y_i) gerados a partir da tabela 3.4 ..	71
4.2 - resultados da aplicação dos mínimos quadrados aos pares (X_i, Y_i) para $D \geq 1$	71
4.3 - equações para estimação do custo, obtidos com os resultados das tabelas 4.1 e 4.2	73
4.4 - estimações de custo usando as equações (4.2) a (4.3)	74
4.5 - desvios percentuais	75
4.6 - estimativas obtidas para as retas de regressão	77
4.7 - dados para a análise de resíduos	82
4.8 - valores de \hat{Y} obtidos para diferentes aproximações da estimativa b	87
4.9 - estimações do custo (\hat{C}) para o caso $j=3$ com diferentes aproximações da estimativa b	88

4.10 - equações para estimação de custo.....	89
4.11 - estimativas obtidas para diferentes períodos ($j=5$)	92
4.12 - estimações de custo (\hat{C}) para diferentes valores da estimativa b	94
4.13 - fatores de correção para a estimativa de custo ...	96
4.14 - estimativas obtidas para as retas de regressão usando diâmetro interno	98
4.15 - estimativas de mínimos quadrados para caso $j=3$..	99
4.16 - estimativas de mínimos quadrados para tubos de aço inoxidável	101
4.17 - relação econômica ótima entre custos (C_v/C_f)	113
4.18 - relação econômica ótima obtidas usando Cole brook	113

C A P I T U L O - 1

INTRODUÇÃO

Introdução ao problema

A otimização de um processo completo raramente é considerada rigorosamente, pois o dimensionamento de uma das partes afeta o de outras. Podemos dizer que a resposta para a otimização será uma série de dimensionamentos alternativos, um deles poderá ser melhor que os outros mas não será o *melhor*.

Um dimensionamento ótimo estará então baseado em condições favoráveis e não na condição favorável, e estas mais que razões técnicas podem ser sociais; por exemplo o consumo de um recurso natural pode estar limitado por razões sociais, logo o dimensionamento de um processo que se utilize daquele recurso estará *a priori* limitado.

As condições econômicas ótimas podem ser analisadas considerando-se custos ou lucros. Um dimensionamento econômico pode estar baseado em condições que resultem no menor custo por unidade de produto, ou maior lucro por unidade de investimento.

Ao considerarmos não mais um processo completo mas um sistema contido nele, podemos conduzir a otimização econômica observando o comportamento de uma certa variável, dita de dimensionamento. Frequentemente nota-se que quando esta variável muda alguns custos aumentam e outros diminuem. Sob esta condição esperamos que o custo total passe por um mínimo e, neste ponto teremos o valor ótimo daquela variável.

De forma geral, os princípios de um dimensionamento econômico podem ser resumidos na figura 1.1.

A curva 1 é a curva de custo anual fixo (C_f) e pode ser representada por:

$$C_f = f(V_d) \quad (1.1)$$

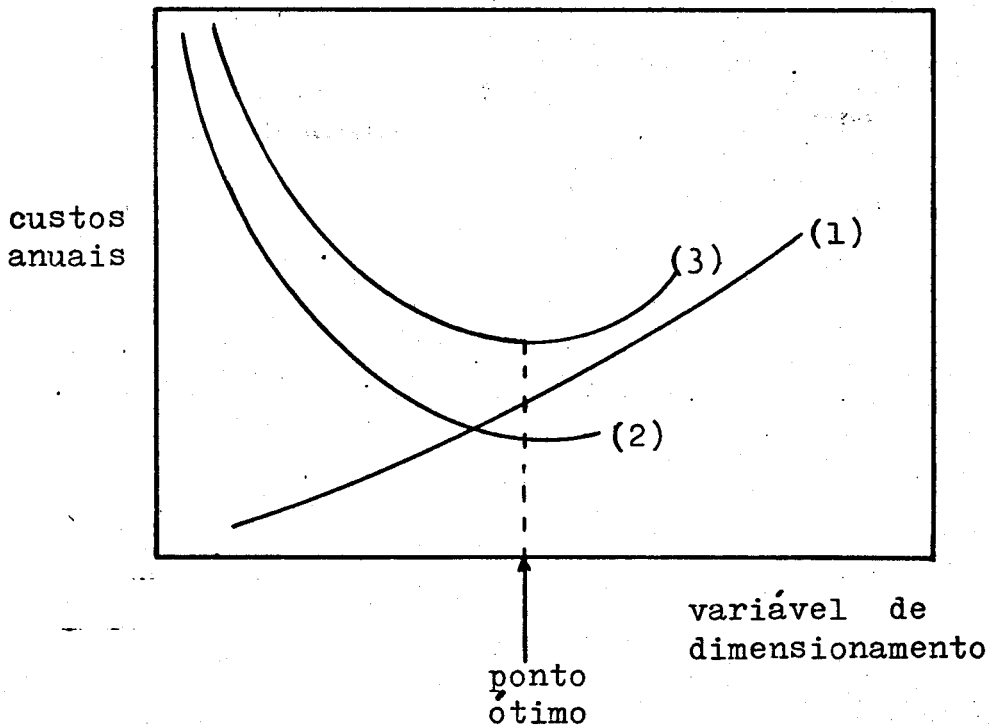


figura 1.1 - princípios de um dimensionamento econômico

A curva 2 é a curva de custo anual variável (C_v) e pode ser representada por:

$$C_v = g(Vd). \quad (1.2)$$

A curva 3 é a curva de custo anual total (C_{tt}) e representa a soma das curvas 1 e 2:

$$C_{tt} = f(Vd) + g(Vd). \quad (1.3)$$

O ponto ótimo da função (menor custo anual total) é obtido quando:

$$\frac{d C_{tt}}{d(Vd)} = f'(Vd) + g'(Vd) = 0 \quad (1.4), \text{ já que}$$

os máximos da função se localizam no infinito, ou seja, quando:

$$\begin{cases} V_d \rightarrow \infty & C_f \rightarrow \infty & e & C_v \rightarrow 0 \\ V_d \rightarrow 0 & C_f \rightarrow 0 & e & C_v \rightarrow \infty \end{cases} \quad (1.5)$$

O procedimento acima aplica-se a funções de uma variável. Quando o custo total é uma função de varias variáveis independentes, temos:

$$C_{tt} = h(V_{d1}, V_{d2}, \dots, V_{dm}) \quad (1.6), \quad o$$

custo total mínimo corresponde à solução obtida pela resolução do sistema de m equações do tipo:

$$\frac{\partial(C_{tt})}{\partial(V_{di})} = 0 \quad , (i = 1, 2, \dots, m) \quad (1.7)$$

Escolhemos o estudo da otimização de diâmetros de tubulações de processo. Pretendemos a escolha do diâmetro do tubo que resulte no transporte mais econômico de um determinado fluido a uma certa taxa de fluxo.

A escolha deste tema baseou-se em dois aspectos:

1. ausência de estudos desta natureza aplicados às condições brasileiras;
2. alta ponderação deste item no investimento fixo de uma planta de processamento.

As etapas do trabalho podem ser agrupadas em três itens:

1. estudo da equação de custo fixo;
2. estudo da equação de custo variável;
3. determinação das equações de otimização econômica.

C A P I T U L O - 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 - INTRODUÇÃO

Tubulações de processo constituem um dos principais itens de custo de plantas de processamento. Este item pode variar de 7 a 60% do custo total de um projeto [5]. Razão pela qual, inúmeros estudos são dedicados a este tópico.

O estudo deste item deve resolver duas questões, (1) o dimensionamento econômico da tubulação e, (2) a estimação precisa do seu custo.

Diversos métodos para a estimação precisa do custo de tubulações de processo tem sido propostos [3,7,8,9,14] e, uma ampla revisão bibliográfica sobre o assunto foi apresentada por PROCESS PIPELINES [23]; mas a discussão deste tema está além dos objetivos deste estudo.

O dimensionamento econômico de tubulações pode estar baseado em dois métodos. Um deles, o método da velocidade, consiste em determinar o diâmetro do tubo que resulte em velocidade de escoamento considerada econômica [1]. O outro baseia-se no balanceamento dos custos envolvidos na operação de transporte de fluidos.

Considerando o segundo método, os fatores de custo envolvidos são: (1) o custo fixo (ou do tubo) que varia diretamente com o diâmetro, (2) o custo variável (bombear líquidos ou movimentar gases) que varia inversamente com o diâmetro [12].

A determinação do ponto mínimo da função custo total (custo fixo mais custo variável) resultaria em uma expressão geral para o diâmetro econômico.

Podemos agora subdividir o estudo em dois grupos:

- (1) determinação do custo fixo,
- (2) determinação do custo variável.

2.2 - Custo fixo

Básicamente duas equações foram utilizadas para expressar o custo fixo.

A primeira delas considera que o custo fixo por unidade de comprimento pode ser expresso como uma função potencia do diâmetro. Se consideramos o custo anual fixo, temos:

$$C_f = (d + m')(F + 1) C_1 D^b \quad (2.1), \text{ onde}$$

D : diâmetro do tubo, pol.

b : constante, adimensional.

d, m', F : representam fatores para depreciação, manutenção e acessórios, respectivamente.

C₁ : custo por unidade de comprimento do tubo de 1 polegada de diâmetro.

A outra equação expressa o custo fixo como uma função da massa por unidade de comprimento. Então, o custo anual fixo fica:

$$C_f = \frac{\pi}{322560} (d + m')(F + 1)(D + t)tS \quad (2.2), \text{ onde}$$

t : espessura da parede do tubo, pol.,

S : custo do tubo por libra de massa.

Outros autores preferem trabalhar com o custo fixo total, expresso em termos da tensão admissível do material (σ) e a pressão máxima de trabalho (p).

Seja (P) a massa de um dado comprimento (L') do tubo.

Temos que: $C_f = \pi \cdot \rho_t' \cdot L' \cdot D' \cdot t' \cdot S'$ (a) (2.3), onde

ρ_t' : densidade do material, kg/m³

D' : diâmetro interno do tubo, m

t' : espessura da parede do tubo, m

S' : custo do tubo por quilograma de massa

seja $t' = pD'/2\sigma$, o custo fixo será:

$$C_{ft} = \pi p D'^2 \rho_t' L' S' / 2\sigma \quad (2.4)$$

A aplicação das equações (2.2) e (2.4) está limitada a casos em que o custo de tubos por unidade de massa se mantém constante, independente do diâmetro considerado.

O uso de (2.1) requer uma análise detalhada do comportamento do custo em relação ao diâmetro. Esta análise, embora necessária, não foi conduzida ou pelo menos discutida por nenhum dos autores que admitiram a variação do custo como uma função potencia do diâmetro.

Sabemos *a priori* que a variável custo é influenciada pelo tempo, o que reforça a importância da análise custo-diâmetro. E mais, que determinar os parâmetros de (2.1) devemos conhecer a influência das oscilações de custo na equação, e para tanto a análise deve ser realizada para dados atuais e históricos. Apenas assim poderemos usar (2.1) futuramente, para estimação de custo, com certo grau de confiança.

(a)

$$D + t \approx D$$

2.3- Custo variável

O custo variável é avaliado pelo consumo de energia durante a movimentação de gases ou líquidos.

Consideremos o escoamento de um fluido de densidade (ρ') em um tubo de corrente, entre os planos (A) e (B), como mostra a figura 2.1.

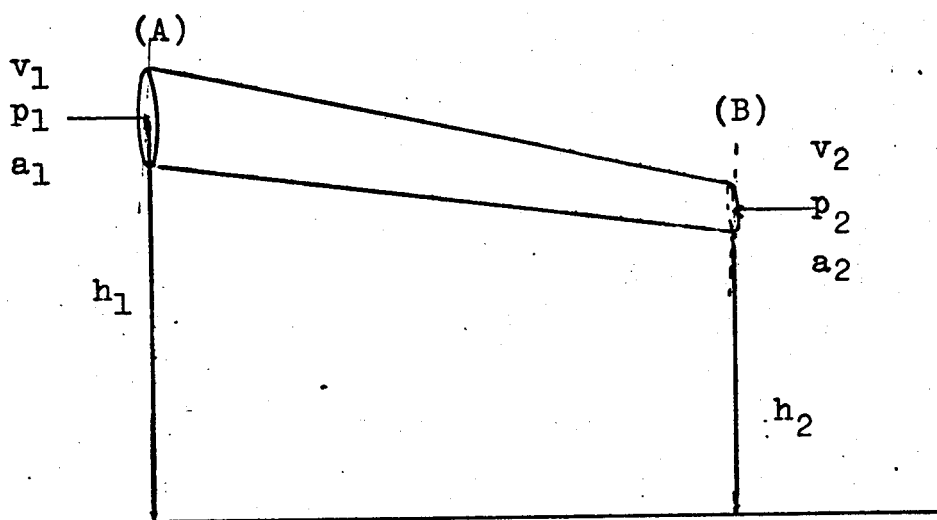


figura 2.1 - escoamento de fluido num tubo de corrente

Admitamos que o fluido seja incompressível ($\rho' = \text{constante}$) e escoe a uma velocidade (v'). Durante um intervalo de tempo (Δt), escoe uma massa (Δm). Para regime estável, pela equação da continuidade podemos escrever:

$$\frac{\Delta m}{\rho'} = a \cdot v' \Delta t = a_1 v_1 \Delta t = a_2 v_2 \Delta t = \text{const.} \quad (2.5)$$

Considerando um escoamento perfeitamente desenvolvido e a ausência de forças de atrito, podemos escrever a equação de

Bernoulli como:

$$\Delta m \cdot g \cdot h_1 + p_1 \cdot a_1 \cdot v_1 \cdot \Delta t + \frac{1}{2} \Delta m \cdot v_1^2 =$$

$$\Delta m \cdot g \cdot h_2 + p_2 \cdot a_2 \cdot v_2 \cdot \Delta t + \frac{1}{2} \Delta m \cdot v_2^2 = \text{Const.} \quad (2.6).$$

onde:

$\Delta m \cdot g \cdot h'$: energia potencial

$p \cdot a \cdot v \Delta t$: energia devida à pressão, realizada durante o tempo (Δt)

$\frac{1}{2} \Delta m \cdot v'^2$: energia cinética das partículas

podemos expressar a equação (2.6) em unidades de pressão dividindo por ($\Delta m / \rho'$):

$$\rho' g h_1 + p_1 + \frac{1}{2} \rho' v_1^2 = \rho' g h_2 + p_2 + \frac{1}{2} \rho' v_2^2 \quad (2.6a), \text{ ou}$$

em unidades de altura de coluna dividindo por ($\rho' g$):

$$h_1 + \frac{p_1}{\rho' g} + \frac{1}{2} \frac{v_1^2}{g} = h_2 + \frac{p_2}{\rho' g} + \frac{1}{2} \frac{v_2^2}{g} \quad (2.6b).$$

Consideremos agora o escoamento de um fluido incompressível ao longo de um condutor circular, e a influência das forças de atrito.

Seja F_a a energia por unidade de massa, dissipada durante o escoamento, devido à fricção. O balanço de energia por unidade de massa será:

$$\frac{p_1}{\rho'} + \frac{1}{2} v_1^2 + h_1 g = \frac{p_2}{\rho'} + \frac{1}{2} v_2^2 + h_2 g + F_a \quad (2.7).$$

A quantidade F_a representa a energia, irreversivelmente convertida em calor.

Apliquemos o balanço (2.7) a um condutor circular horizontal de secção transversal constante, na ausência de trabalho realizado pelo fluido temos:

$$F_a = \frac{P_1 - P_2}{\rho'} = \frac{\Delta P_a}{\rho'} \quad (2.8), \text{ e para}$$

a massa \underline{m} escoando por unidade de tempo temos:

$$F_a = m \frac{\Delta P_a}{\rho'} = (q') (\Delta P_a) \quad (2.8a).$$

A expressão (2.8a) é a expressão final para a perda de energia durante escoamentos incompressíveis.

2.3.1-Cálculo da perda de carga

Consideremos o escoamento de um fluido incompressível em um comprimento ($d\ell$) de um ducto circular de diâmetro (d). A força friccional (F_f) total nas paredes do condutor é igual ao produto da tensão (R) pela área superficial interna do ducto. Então:

$$F_f = (R) (\pi d) (d\ell) \quad (2.9).$$

Esta força friccional provoca uma variação de pressão (dP), do balanço de força temos:

$$(R) (\pi d) (d\ell) = (dP) \frac{\pi d^2}{4} ,$$

$$dP = \frac{4R}{d} (d\ell) ,$$

$$dP = 4 \left(\frac{R}{\rho' v'^2} \right) \left(\frac{\rho' v'^2}{d} \right) (d\ell) ;$$

seja $f = \frac{8R}{\rho' v'^2} ,$

$$dP = 4 \left(\frac{f}{8} \right) \frac{\rho' v'^2}{d} (d\ell) \quad (2.10), \text{ para}$$

um fluido incompressível escoando em ducto circular* v' não é função nem da pressão nem do comprimento. Então a equação (2.10) pode ser integrada diretamente,

$$\Delta P_a = f \rho \frac{v'^2 \ell}{2d} \quad (2.11), \text{ que é}$$

conhecida como equação de Darcy-Fanning.

O fator de fricção (f) representa a relação entre a tensão na parede e a pressão dinâmica. O fator f esta baseado em dados experimentais, é uma função do número de Reynolds (Re) e da rugosidade relativa do ducto ($\epsilon = e/d$).

A equação (2.11) aplica-se a escoamentos incompressíveis. E um escoamento pode ser considerado incompressível se (1) a substância que escoar é um líquido, ou (2) se é um gás cuja mudança na densidade não ultrapassê os 10 por cento. Neste caso se a densidade na entrada do sistema é considerada, o êrro resultante no cálculo da perda de carga geralmente não excederá os limites de incerteza do fator de fricção [18].

*de secção transversal constante.

Para o escoamento de fluidos em regime laminar, temos:

$$f = \frac{64}{Re} \quad (2.12), \text{ subs-}$$

tituindo em (2.11) obtemos:

$$\Delta P_a = 32 \frac{\mu v' l}{d^2} \quad (2.13), \text{ esta}$$

equação é conhecida como equação de HAGEN-POISEUILLE.

Na região de escoamento turbulento ($Re > 3000$) [18], numero_sas correlações para o fator de fricção (f) foram propostas e podem ser agrupadas em:

- correlações para tubos rugosos e totalmente rugosos;
- correlações para tubos lisos.

Correlações para tubos rugosos e totalmente rugosos

Para tubos rugosos, na região de escoamento onde f é função do número de Reynolds e da rugosidade relativa, aplica-se a equação de Colebrook:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left[\frac{\epsilon}{3,70} + \frac{2,51}{Re \sqrt{f}} \right] \quad (2.14),$$

quando $\frac{\epsilon}{3,70} \gg \frac{2,51}{Re \sqrt{f}}$ (Re muito elevado) temos:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 1,136 - 2 \log_{10} \epsilon \quad (2.15)$$

Correlação para tubos lisos

a) A correlação de Prandtl [17] aplica-se para $R_e \leq 10^7$ [6]:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \log_{10} (R_e \sqrt{f}) - 0,80. \quad (2.16)$$

b) Para $R_e < 10^5$ [17]:

$$f = \frac{0,316}{R_e^{0,25}} \quad (\text{Blasius, 1912}). \quad (2.17)$$

c) Para $5000 < R_e < 200.000$ [11]:

$$f = \frac{0,184}{R_e^{0,2}}. \quad (2.18)$$

d) Para $10^5 < R_e < 10^6$ [17]:

$$f = 0,0054 + \frac{0,396}{R_e^{0,3}} \quad (\text{Herman}). \quad (2.19)$$

e) Para $3000 < R_e < 3 \cdot 10^6$ [11]:

$$f = 0,00560 + \frac{0,5}{R_e^{0,32}}. \quad (2.20)$$

f) Para $10^5 < R_e < 10^8$ [17]:

$$f = 0,0032 + \frac{0,221}{R_e^{0,237}} \quad (\text{Nikuradse, von Karman, 1930}). \quad (2.21)$$

g) Para $4000 < R_e < 20 \cdot 10^6$ [12]:

$$f = \frac{0,16}{R_e^{0,16}}. \quad (2.22)$$

A maioria dos escoamentos ocorrem na região turbulenta, onde nenhuma equação simples e correta, como a (2.12) para a região laminar, foi determinada.

Dois métodos são empregados para a determinação da perda de carga, são adequados e corretos para dimensionamento de plantas.

No primeiro, usa-se o diagrama de Moody onde o fator de fricção (f) está expresso como função de Re e $\epsilon = e/d$. Se estamos calculando o diâmetro ou a taxa de fluxo este método necessita tentativas e erros, pois estas variáveis estão incluídas no número de Reynolds e na rugosidade relativa; ou o uso de diagramas baseados em outros expoentes para os adimensionais.

No segundo, usam-se as correlações para tubos lisos e a equação de Darcy-Fanning.

As correlações para tubos lisos podem ser agrupados em:

$$f = a + pRe^j, \quad (2.23)$$

$$f = aRe^j. \quad (2.24)$$

Equações do tipo (2.23) ajustam melhor os dados do que as do tipo (2.24). Mas quando substituídas na equação (2.11) resultam em incomodas equações de termos aditivos. As do tipo (2.24) resultam em equações simples e suficientemente corretas para o dimensionamento de plantas, e o erro resulta em segurança, ou seja, maior perda de carga, maior diâmetro ou menor taxa de fluxo é indicado [12].

2.3.2 - Equações para custo variável

Consideremos que o custo variável seja expresso como o custo anual variável por unidade de comprimento do tubo. Teremos

de (2.8a) que:

$$C_v = (1,35 \times 10^{-3}) (h) (C_2/E) (q) (\Delta P_f / \ell) \quad (2.25), \text{ onde}$$

E representa a eficiência global do motor e bomba.

Note-se que agora estamos trabalhando com unidades do sistema técnico inglês (lb, lbf, pé, seg).

Consideremos o escoamento laminar de fluidos newtonianos, a perda de carga é expressa pela equação (2.13), logo o custo anual variável fica:

$$C_v = (5,5 \times 10^{-2}) \frac{(h) (C_2/E) (\mu) (q^2)}{g_c D_f^4} \quad (2.26), \quad \text{ou}$$

$$C_v = (7,66 \times 10^{-1}) \frac{(h) (C_2/E) (Z) (q^2)}{g_c D^4} \quad (2.27)$$

Tomemos agora o escoamento turbulento, e admitamos que podemos usar (2.22). Então, substituindo (2.22) em (2.11) e em seguida em (2.25), teremos:

$$C_v = (8,75) \frac{(h) (C_2/E) (Z^{0,16}) (\rho^{0,84}) (q^{2,84})}{g_c D^{4,84}} \quad (2.28)$$

2.4- Custo total e custo mínimo

O custo anual total obtêm-se pela soma do custo anual

fixo e custo anual variável.

$$C_{tt} = C_f + C_v \quad (2.29).$$

O mínimo da função será dado por:

$$\frac{dC_{tt}}{d(D)} = 0 \quad (2.30).$$

2.5- Soluções de otimização econômica

Genereaux [12], utilizando-se da equação (2.1) e equação (2.28), obteve para escoamento em regime turbulento:

$$D_o^{4,84 + b} = \frac{0,0348 \cdot m^{2,84} \cdot z^{0,16} \cdot h \cdot C_2}{b(d+m')(F+1)C_1 \rho^2 E} \quad (2.31)$$

O autor considerou que para canos de aço b é essencialmente 1,5. Substituindo este valor na equação (2.31) temos:

$$D_o = \frac{m^{0,448} \cdot z^{0,025}}{\rho^{0,315}} \left[\frac{0,0232 \cdot h \cdot C_2}{(d+m')(F+1)C_1 E} \right]^{0,158} \quad (2.31a)$$

F custo

A expressão de custo (F custo) foi atribuído um valor médio, estimado com valores extremos e normais da época. O fator $z^{0,025}$ foi desprezado, pois é aproximadamente igual à unidade para a maioria dos valores de z [12]. Com estas simplificações a equação (2.31a) ficou:

$$D_o = 2,2 m^{0,448} / \rho^{0,315} \quad (2.31b)$$

A equação (2.31b) aplica-se a fluidos cujas viscosidades estejam entre 0,02 e 30 centipoises. A figura 2.2 mostra a resolução gráfica de (2.31b).

SARCHET e COLBURN [24] apresentaram soluções para escoamentos em regime laminar e turbulento; utilizaram para expressar o custo fixo (2.1), (2.27) e (2.28) para expressar o custo variável.

Na região de escoamento laminar, propuseram:

$$D_o^{4+b} = \frac{0,096 q^2 Z h C_2}{b(d+m')(F+1)EC_1} \quad (2.32)$$

Para tubos de aço comum de diâmetro nominal até uma polegada o custo do tubo aumenta aproximadamente a primeira potência do diâmetro; para diâmetros maiores o custo do tubo é aproximadamente proporcional a 1,5 potência do diâmetro [24]. Então:

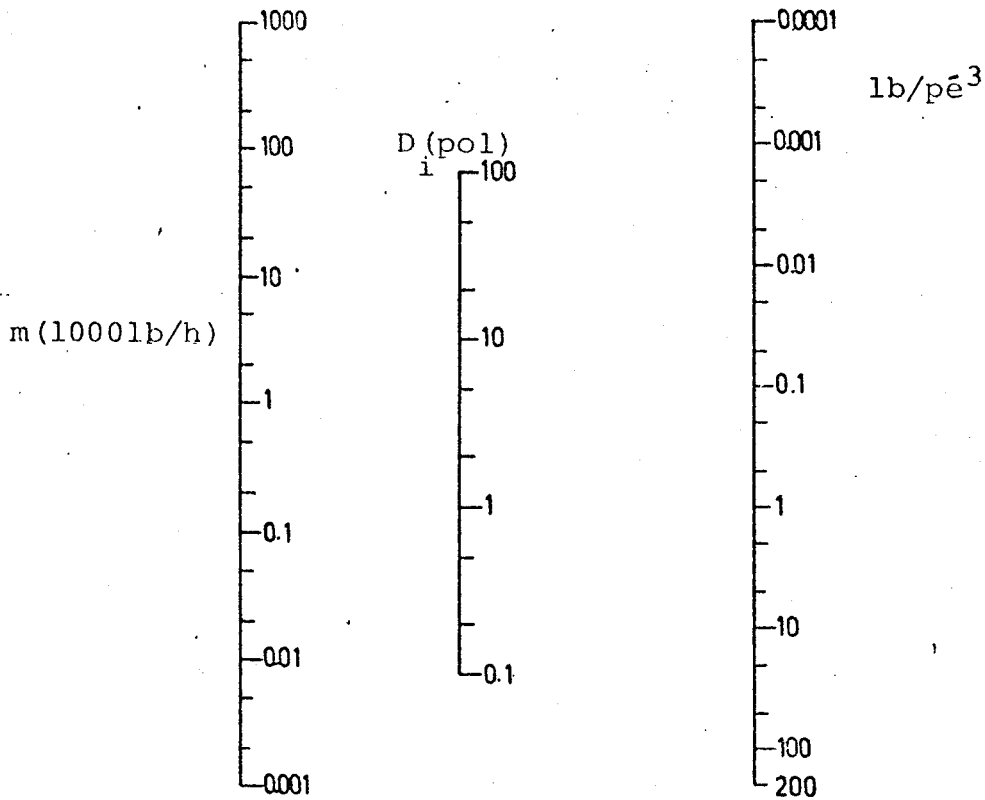
para $D < 1$ polegada

$$D_o = q^{0,4} Z^{0,2} \left[\frac{0,096 h C_2}{(d+m')(F+1)EC_1} \right]^{0,2} \quad (2.32a),$$

para $D > 1$ polegada

$$D_o = q^{0,36} Z^{0,18} \left[\frac{0,064 h C_2}{(d+m')(F+1)EC_1} \right]^{0,18} \quad (2.32a')$$

Na região de escoamento turbulento a equação (2.31), proposta por Genereaux [12], foi adaptada às condições de traba-



exemplo: determine o diâmetro econômico para transportar
 1500 lb/h de ar a $50 \text{ lb}_f/\text{pol}^2$ (manométrica), 20°C .

Calcule a densidade $= 0,341 \text{ lb/pē}^3$ e ligue este valor
 a $m=1,5$, leia $D=3,8$ e use um tubo de 4 pol.

fig.2.2 - diâmetro econômico: escoamento turbulento [12]

lho dos autores, resultando:

para $D < 1$ polegada

$$D_o = q^{0,49} z^{0,027} \rho^{0,14} \left[\frac{1,32 h C_2}{(d+m')(F+1)EC_1} \right]^{0,17} \quad (2.31.c),$$

para $D > 1$ polegada

$$D_o = q^{0,45} z^{0,025} \rho^{0,13} \left[\frac{0,88 h C_2}{(d+m')(F+1)EC_1} \right]^{0,16} \quad (2.31.c')$$

Os termos entre parenteses representam os fatores de custo, podem na prática serem avaliados de acordo com cada situação. Como estes fatores afetaram o diâmetro ótimo somente a uma raiz sexta, valores médios podem ser substituídos e as equações simplificadas resultantes serão obedecidas para os casos normais [24]. Os autores utilizaram as aproximações de Genereaux [12], e obtiveram:

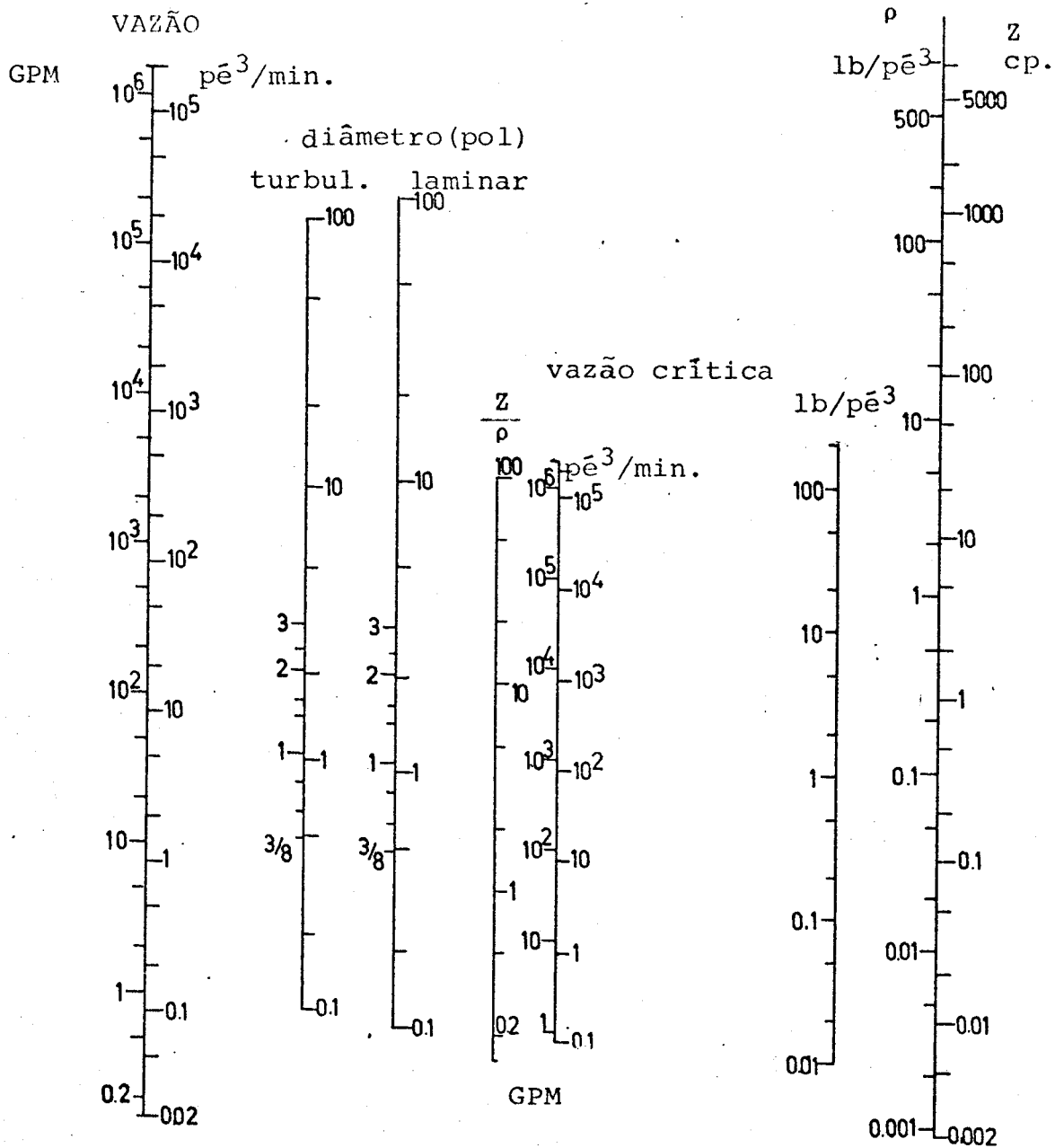
- escoamento laminar

para $D < 1$ polegada

$$D = 3,6 q^{0,4} z^{0,2} \quad (2.32.b),$$

para $D > 1$ polegada

$$D = 3,0 q^{0,36} z^{0,18} \quad (2.32.b'),$$



leitura: laminar - ligue viscosidade com vazão
 turbulento - ligue densidade com vazão

fig.2.3 - diâmetro econômico: escoamento laminar e turbulento | 24 |

- escoamento turbulento

para $D < 1$ polegada

$$D_o = 4,7 q^{0,49} \rho^{0,14} \quad (2.31.d),$$

para $D > 1$ polegada

$$D_o = 3,9 q^{0,45} \rho^{0,13} \quad (2.31.d')$$

As equações (2.31.d) e (2.31.d') aplicam-se a fluidos de viscosidade entre 0,02 e 30 centipoises.

A figura 2.3 mostra a resolução gráfica das equações (2.32.b), (2.32.b'), (2.31.d) e (2.31d'); por simplicidade os resultados para escoamento em regime laminar e turbulento foram apresentados num mesmo gráfico. Para utilizarmos a figura 2.3 devemos primeiramente determinar em que diagrama deve ser feita a leitura, usando a relação obtida pela resolução simultânea das equações (2.32b') e o número de Reynolds crítico ($Re = 2100$) expresso em termos da taxa de fluxo. O diagrama interno da figura 2.3 mostra a resolução da equação:

$$q_{crit.} = 0,13 \frac{z^{1,86}}{\rho^{1,57}} \quad (2.32c)$$

Embora as equações simplificadas apliquem-se a um amplo intervalo de variação dos fatores de custo, sob certas condições algumas correções podem ser desejáveis [24]. O fator de correção a ser aplicado será:

$$F_c = \frac{8760}{h} \cdot \frac{(d+m')(F+1)C_1}{0,013} \cdot \frac{0,01E}{C_2} \quad (2.32d)$$

Na região de escoamento laminar os fatores de custo tem o mesmo expoente que a viscosidade, como mostram as equações (2.32a) e (2.32a'). Se a viscosidade for dividida pelo fator de correção (F_c) e este novo valor for usado para a leitura no diagrama, o diâmetro correto será obtido. Na região de escoamento turbulento, os fatores de custo têm expoente ligeiramente diferente do da densidade. Então, dividindo a densidade pelo fator de correção (F_c) e usando este valor para a leitura no diagrama, teremos uma solução aproximadamente correta para as equações (2.31c) e (2.31c'). Se a viscosidade for maior que 30 centipoises, o diâmetro calculado de verá ser multiplicado por $Z^{0,025}$, esta correção será usualmente pequena [24].

Os autores discutem também as limitações do uso do método da velocidade. Construíram a tabela 2.1 para ilustrar os limites do método.

"Na região de escoamento turbulento podemos dizer com algum grau de segurança que para a maioria dos líquidos, o diâmetro ótimo do tubo poderia estar baseado em uma velocidade de três pés por segundo (3pé/seg) para tubos de diâmetros pequenos; e em quatro pés por segundo (4pé/seg) para tubos de diâmetros maiores. Para fluidos leves e gases a velocidade econômica é muito maior e varia num amplo intervalo. Como aproximação podemos dizer que a velocidade econômica na região de escoamento turbulento varia com o inverso da raiz cúbica da densidade. Na região de escoamento laminar é impossível estabelecer uma velocidade econômica média, mas podemos dizer que a velocidade econômica nesta região varia com o inverso da raiz quadrada da viscosidade [24]".

PETER e TIMMERHAUS [20] apresentaram soluções para escoamentos em regime laminar e turbulento utilizando as equações (2.1), (2.27) e (2.28), porem introduziram o fator J para perda de carga em acessórios expresso como perda fracionária equivalente ao tubo reto, e o fator B' uma constante independente do

Tabela 2.1 - Velocidades (pé/s) quando diâmetro do tubo é ótimo

escoamento laminar			
D_n (pol)	$Z_{(a)} = 10$	$Z = 100$	$Z = 1000$
1	3,06	0,97	0,31
2	-	1,5	0,49
4	-	2,5	0,77
8	-	4,1	1,30

(a) Z em centipoises

escoamento turbulento					
$\rho = 0,0075$ (b)	$\rho = 0,075$	$\rho = 0,75$	$\rho = 7,5$	$\rho = 50$	$\rho = 75$
41,6	20,8	10,5	5,3	3,1	2,6
44,3	22,8	11,4	5,5	3,2	2,9
51,0	25,4	13,2	6,6	3,8	3,3
61,0	31,0	15,5	7,7	4,3	3,9

(b) ρ em libra por pé cúbico

diâmetro. Então (2.27) e (2.28) ficam:

$$C_v = \frac{0,024 q^2 z C_2 (1 + J) h}{D^4 E} + B' \quad (2.27a),$$

$$C_v = \frac{0,273 q^{2,84} \rho^{0,84} z^{0,16} C_2 (1 + J) h}{D^{4,84} E} + B' \quad (2.28a)$$

As soluções simplificadas apresentadas pelos autores são exatamente iguais as propostas por Sarchet e Colburn [24]. Os autores apenas ressaltam que as equações (2.31d') e (2.32b') es tão definidas para diâmetros maiores ou igual a uma polegada; e que para escoamento turbulento as equações simplificadas aplicam-se para fluidos de viscosidade entre 0,02 e 20 centipoises e não entre 0,02 e 30 centipoise como consideram Generaux [12], Sarchet e Colburn [24].

Os valores utilizados pelos autores para obterem as equações simplificadas são mostradas na tabela 2.2.

Apresentam ainda uma solução onde o custo do capital ou retorno sobre o investimento, custo do equipamento de bombeio, impostos, e o valor do dinheiro no tempo foram considerados. Para escoamento turbulento em canos de aço temos:

$$\frac{D_o^{4,84 + b}}{1 + 0,794 L_e' D_o'} = \frac{0,000189 \gamma C_2 w^{2,84} z^{0,16} \{ [1 + (d' + m') M] (1 - \theta) + RM \}}{b(F+1) C_1 [R + (d + m') (1 - \theta)] E \rho^2}$$

(2.33)

A equação (2.33) se reduz a:

$$D_o' = \frac{(1 + 1,865 D_o)^{0,158} (0,32)_w^{0,45}}{(1 + F)^{0,158} \rho^{0,32}} \quad (2.33a), \text{ quan}$$

do substituídos os valores apresentados na tabela 2.3. A tabela 2.4 compara os resultados obtidos pelo uso das equações (2.31d' e 2.33a).

WRIGHT [26] adaptou a equação apresentada por Perry [3ª edição], para que o custo anual fixo do tubo incluísse depreciação, manutenção, taxas e seguros, gastos gerais da planta e retorno sobre o investimento; e incluiu o fator J de perda de carga em acessórios.

A equação de otimização do diâmetro para escoamento turbulento ficou:

$$D_o^{4,84} = \frac{0,0348 m^{2,48} z^{0,16} h C_2 (1+J)}{b \times E \rho^2} \quad (2.34)$$

O autor estimou que o valor de b é 1,3 baseando-se nos preços publicados por Dickson [9]. Substituindo este valor temos:

$$D_o = \frac{m^{0,463} z^{0,026}}{\rho^{0,326}} \left[\frac{0,0268 h C_2 (1+J)}{\times E} \right]^{0,163} \quad (2.35)$$

As diferenças entre os expoentes das equações (2.31a) e (2.35) são devidas ao fato dos dois autores terem considerado diferentes valores para b . Wright considerou que os valores mostrados na tabela 2.5 resultavam em boa aproximação e obteve:

$$D_o = 0,42 \frac{m^{0,463}}{\times^{0,163}} \quad (2.35a)$$

A figura 2.4 mostra a resolução da equação (2.35a).

Tabela 2.2 - Valores empregados para a obtenção das equações (2.32b), (2.32b'), (2.31d) e (2.31d') (*)

variavel	valor
C_2	\$ 0,0085/
J	0,35 ou 35 por cento
h	8760 horas/ano
E	0,50 ou 50 por cento
F	1,4
(d+m')	0,20 ou 20 por cento
C_1	\$ 0,07 por pé de cano de aço de diâmetro igual a 1 polegada

*os autores citam Generaux [12], Sarchet e Colburn [24]

Tabela 2.3 - Valores empregados para obter a equação (2.33a). Para escoamento turbulento-cano de aço-diâmetro igual ou maior 1 polegada

variavel	valor usado	variavel	valor usado
b	1,5	η	0,39
L'_e	2,35	R	0,2
Y	3,28	C_1	2,91
C_2	0,0085	d+m'	0,2
Z	1,0	d+m''	0,4
M	0,8	E	0,5

A variável F é um função do diâmetro e pode ser aproximada por $F = 0,75/D'_0 + 3$

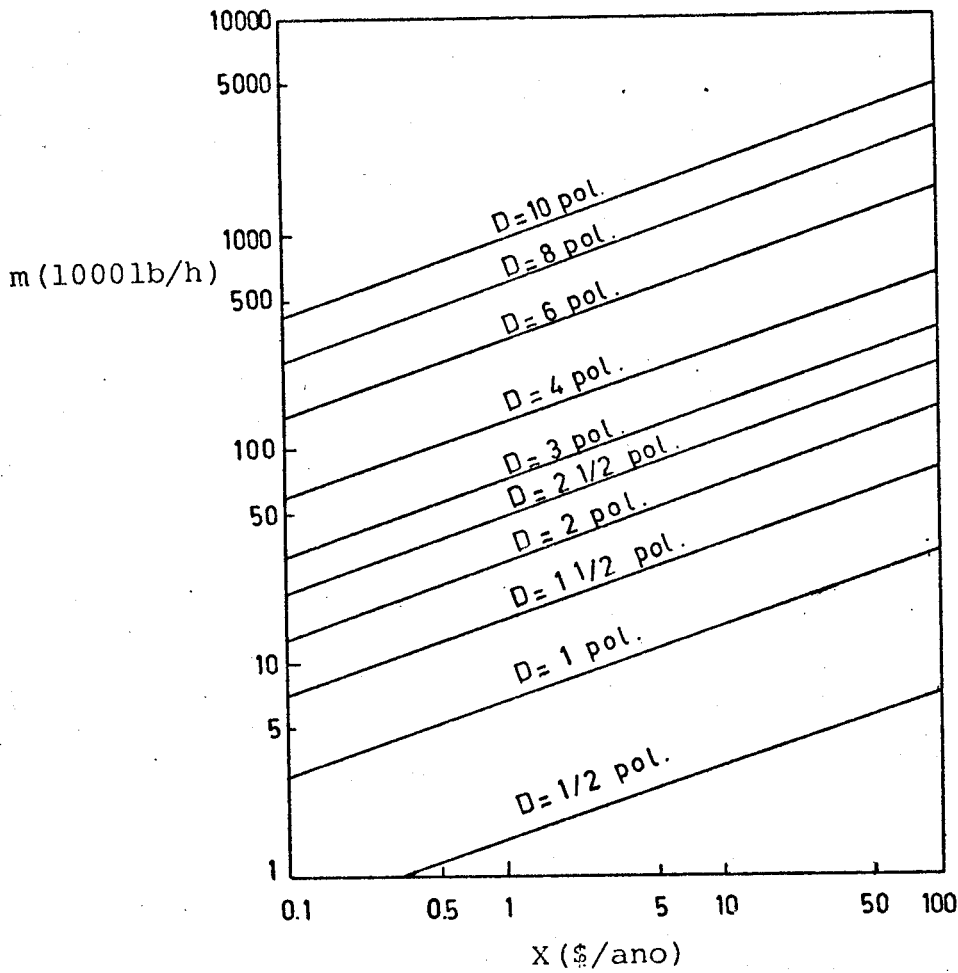
Tabela 2.4 - Comparação entre diâmetros econômicos estimados pelas equações (2.31d') e (2.33a).

- Escoamento turbulento-cano de aço-"Sch. 40"-aproximadamente 15 pés entre acessórios

D _o (polegadas)		w	ρ
Eq. (2.31d')	Eq. (2.33a)	lb/s	lb/pé ³
11,2	10,0	450	200
6,1	5,0	4,5	2
3,9	3,0	12,5	35
2,2	1,5	0,45	2

Tabela 2.5 - Valores considerados para obtenção da equação (2.35a)

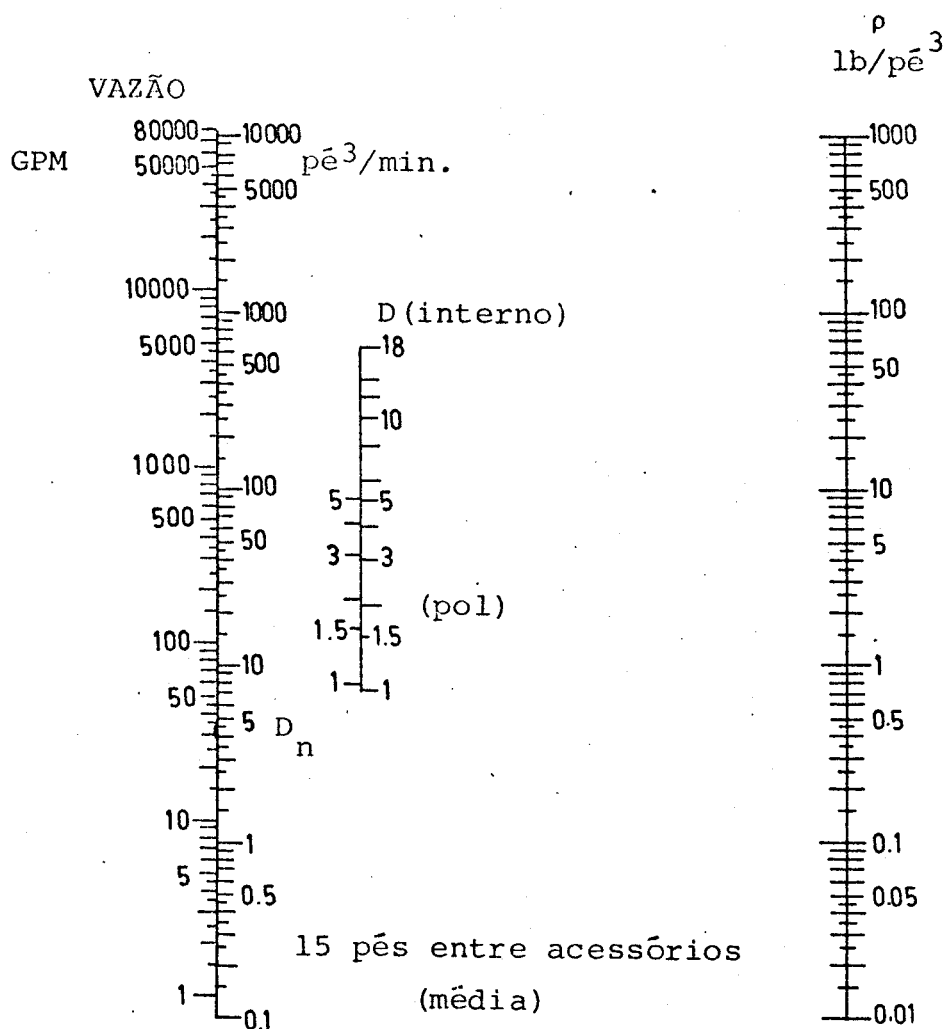
variavel	valores
C ₂	\$ 0,015/kwh
J	0,50 ou 50 por cento
h	8000 h/ano
E	0,40 ou 40 por cento
ρ	50 lb/ft ³
Z	1 centipoise



quando a densidade é muito diferente do valor mostrado na tabela 2.3, deve-se aplicar a seguinte correção.

$$D_c = 3,58 D_o / \rho^{0,326}$$

fig.2.4 - diâmetro econômico: escoamento turbulento [26]

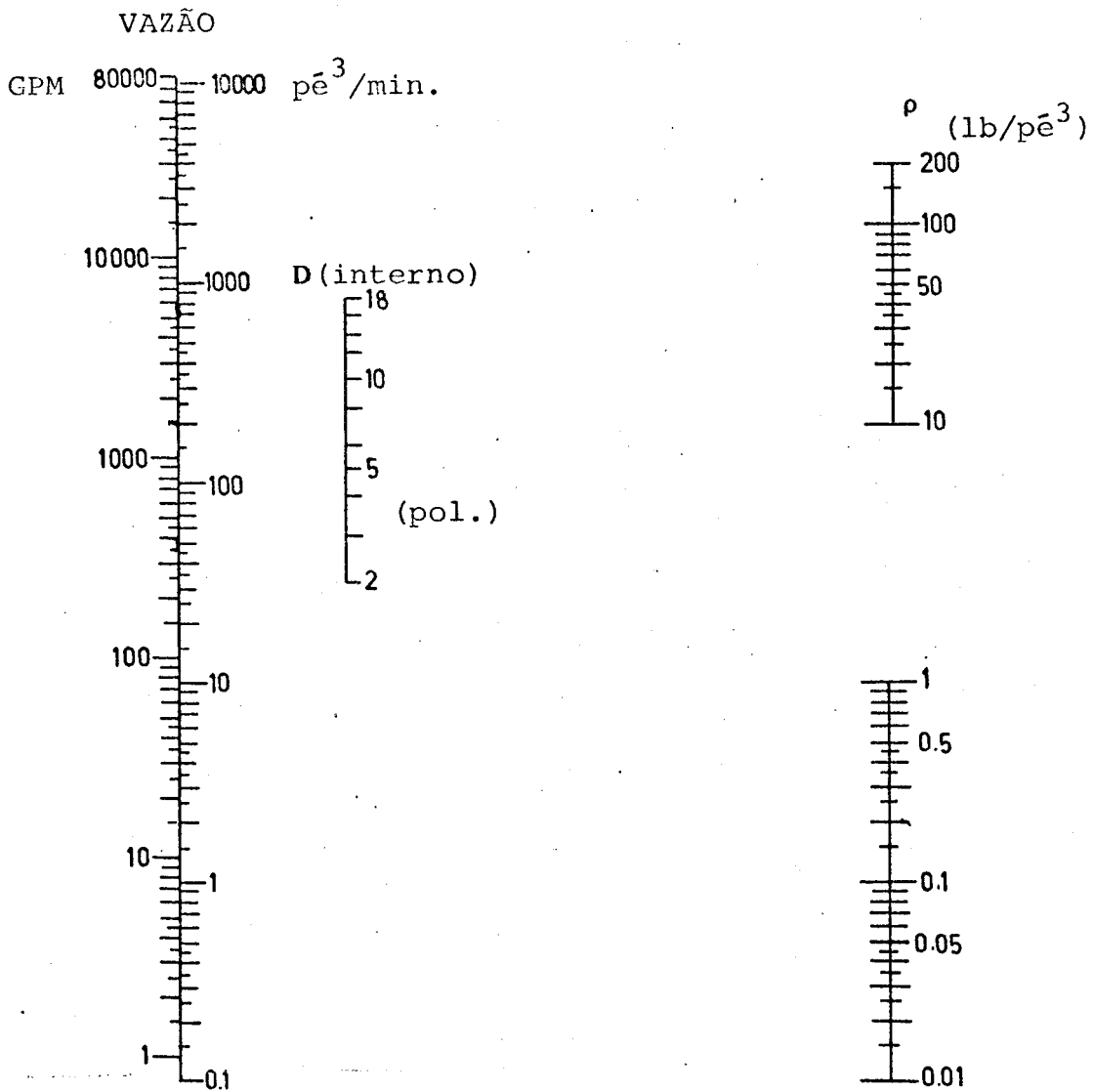


leitura: ligue vazão com densidade

- tubo de aço Sch.40 -

fig.2.5 - diâmetro econômico escoamento turbulento

[18]



leitura: ligue vazão com densidade

- tubo de aço Sch.40 -

fig.2.6 - diâmetro econômico: escoamento turbulento [19]
to

PIPE and PIPELINES [21], utilizando-se da equação (2.2)* e a equação (2.27) e (2.28) com as alterações introduzidas por Peter e Timmerhaus [20], obtiveram para regime laminar e turbulento respectivamente:

- para escoamento laminar

$$D_o = \frac{5,26 q^{0,4} z^{0,2}}{s^{0,2} t^{0,2}} \quad (2.37),$$

- para escoamento turbulento

$$D_o = \frac{6,49 q^{0,486} p^{0,144} z^{0,027}}{s^{0,171} t^{0,171}} \quad (2.38)$$

Os autores adotaram a equação (2.2) como expressão para o custo do tubo por representar melhor as condições de compra de tubos no mercado do Reino Unido.

As equações (2.37) e (2.38) devem ser resolvidas por tentativas e erros. A figura 2.7 mostra a solução gráfica destas equações.

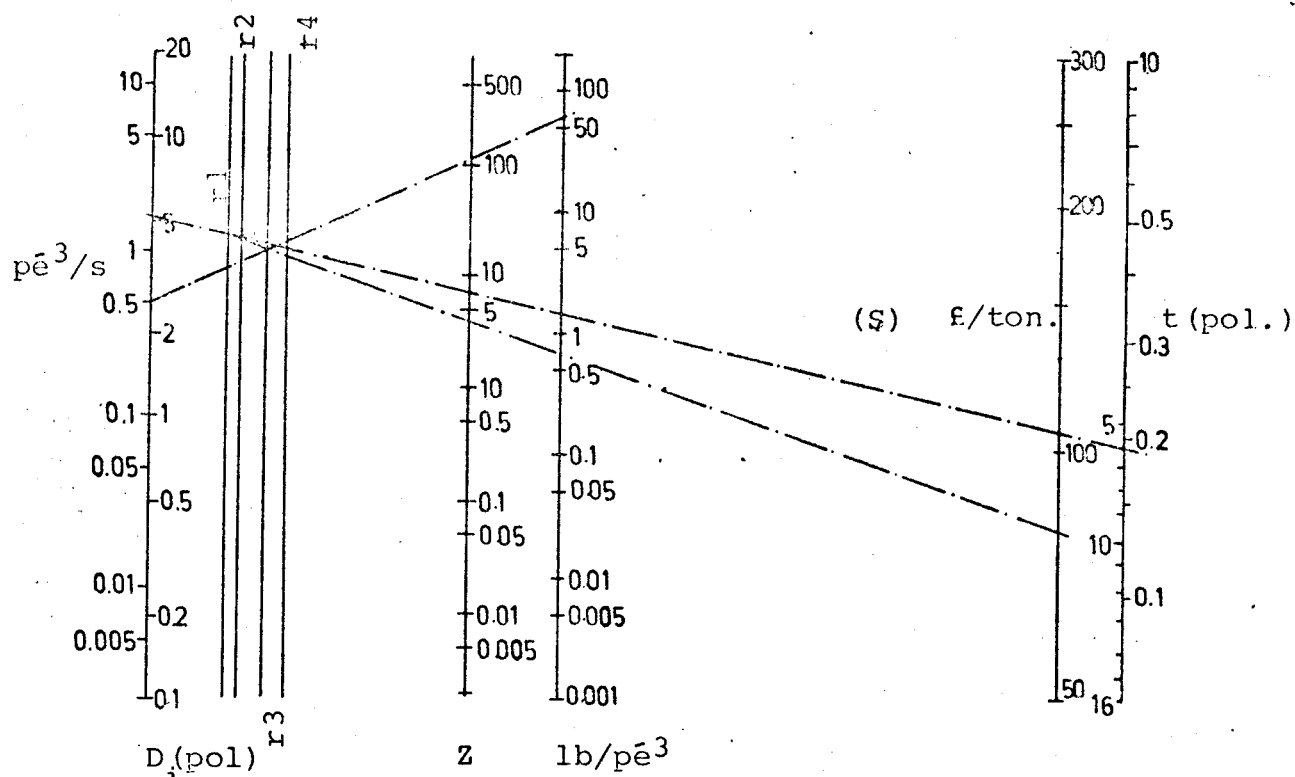
Os autores assumiram valores correntes da época (ver tabela 2.7) para custo de tubos de aço carbono e aço inoxidável e obtiveram:

- escoamento laminar

$$D_o = 2,52 q^{0,40} z^{0,20}, \quad \text{aço carbono} \quad (2.39);$$

$$D_o = 2,02 q^{0,40} z^{0,20}, \quad \text{aço inoxidável} \quad (2.40);$$

*ao fator $\underline{d+m'}$ somaram o fator \underline{c} de lucro mínimo



r_1, r_3 : referênça turbulento r_2, r_4 : referênça laminar

fig.2.7 - diâmetro econômico: escoamento laminar e turbulento (sol.exatas) [21]

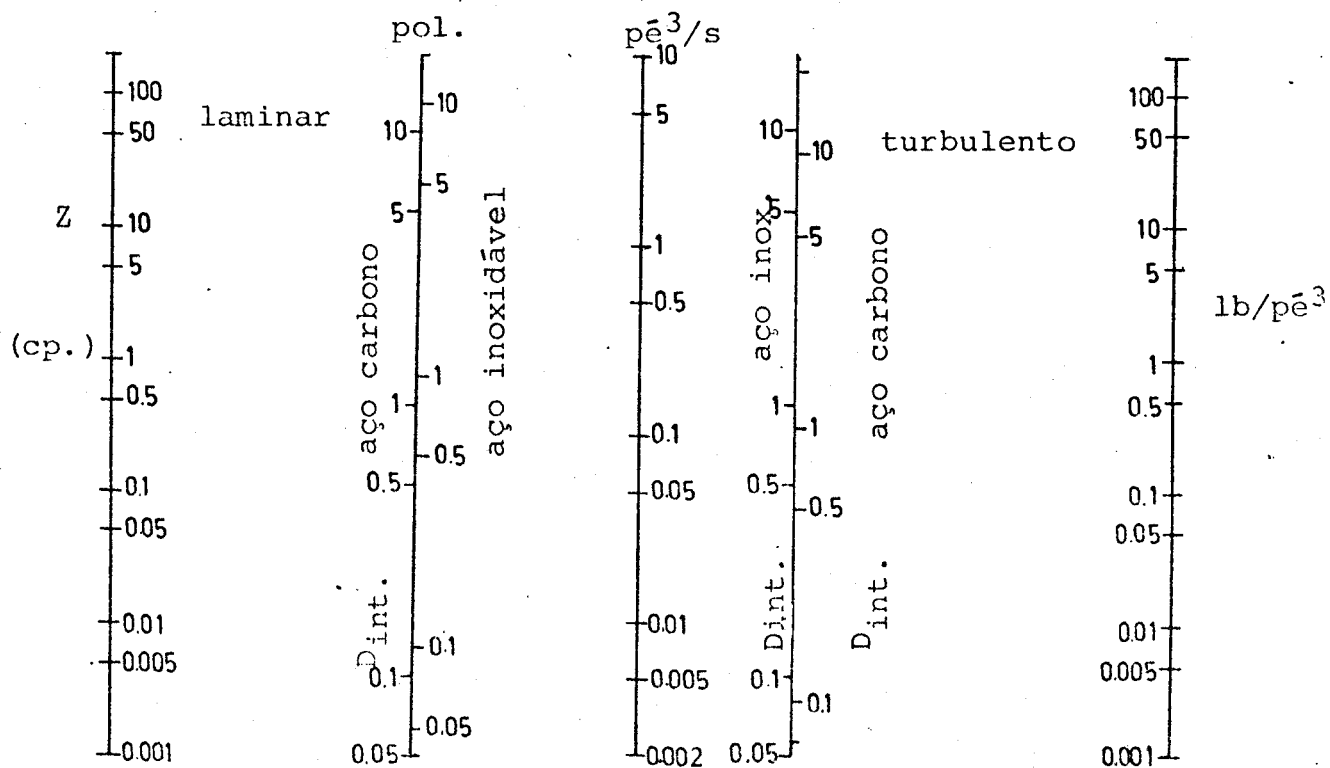


fig.2.8 - diâmetro econômico: escoamento laminar e turbulento (sol.aproximadas) [21]

- escoamento turbulento

$$D_o = 3,45 q^{0,49} \rho^{0,14}, \text{ aço carbono} \quad (2.41);$$

$$D_o = 2,86 q^{0,49} \rho^{0,14}, \text{ aço inoxidável} \quad (2.42).$$

Verifique-se a semelhança entre (2.32b) e (2.39) e (2.40); e entre (2.31d) e (2.41) e (2.42). Estas equações diferem apenas quanto aos valores das constantes, que foram calculadas

Tabela 2.7 - Valores das variáveis usados por Pipe and Pipelines [21]

variável	valor usados
(d+m')	0,15
C ₂	1,0d
J	0,35
h	8760 horas/ano
S	{ 80 £/ton aço comum 240 £/ton aço inoxidável
c	0,20
E	0,50

segundo as características de cada época e região. A fig. 2.8 mostra a resolução das equações simplificadas.

Em todos os trabalhos discutidos anteriormente, a expressão do custo variável foi obtida considerando-se a equação (2.22).

ONIGA [17] trabalhou com custos totais, ou seja, custo total fixo e custo total variável. Utilizou a expressão (2.4), (2.11) e (2.25) adaptadas às condições de trabalho do autor. O custo variável total em regime turbulento ficou:

$$C_{v_t} = \frac{0,0826 \rho' L' q'^3 f_s C_2}{D'^5} \quad (2.43),$$

que resulta em:

$$D_o'' = 0,75 \left[\frac{\sigma}{\rho} \frac{\rho'}{\rho_t} q'^3 s f \frac{C_2}{S'} \right]^{1/7} \quad (2.44)$$

PRESTO-SOKOLSKI [22] em 1966 - 67 adaptaram a equação de ONIGA [17] às condições locais do Uruguai e obtiveram duas equações simplificadas para água e vapor:

- para vapor a pressão de 5 kg/cm²

$$D_o = 0,199 q''^{3/7} \quad (2.45),$$

- para água

$$D_o = 0,670 q''^{3/7} \quad (2.46)$$

Analisemos agora o escoamento de água e determinemos os diâmetros econômicos. Os resultados estão indicados na tab. 2.8.

O dimensionamento econômico do diâmetro de tubulações depende basicamente das condições econômicas da região estudada e da época na qual este estudo foi realizado. As variáveis econômicas modificam-se com o transcorrer dos anos e esta mudança é

tanto mais acentuada quanto menor for o grau de desenvolvimento da região; economias instáveis são características de países subdesenvolvidos ou em desenvolvimento.

Para ilustrar o efeito das diferentes épocas, podemos comparar os resultados de Genereaux [12] e Perry [18]. O resultado de Genereaux [12] é 43% maior que o resultado de Perry [18], um erro considerável já que temos um diâmetro padrão entre os valores encontrados. O resultado de Genereaux é 32% maior que o resultado de Presto-Sokolski [22] ou 17% maior que o resultado de Pipe and Pipelines [21], o que demonstra que as condições regionais têm certo grau de influência, e estas influências se mostram maior para as regiões economicamente mais distintas.

Tabela 2.8 - Comparação entre os diâmetros econômicos obtidos pelos diagramas dos diferentes autores

fluido = água		$\rho = 62,4 \text{ lb/pé}^3$	$q = 10 \text{ pé/min}$	
Autor	Fig.	diâmetro econômico (pol.)	R_e	
GENEREAUX [12]	2.2	3	70.000	
SARCHET e COLBURN [24]	2.3	3	70.000	
WRIGHT [26]	2.4	2 *	105.000	
PERRY [18]	2.5	2	100.000	
PERRY [19]	2.6	< 2	-	
PIPE and PIPELINES [21]	2.8	2,56	82.000	
PRESTO-SOKOLSK [22]	Eq. (2.46)	2,27	92.500	

(*) cano de aço preto - ASTM-A 120 bitola 40 ("Sch. 40") - para estimar o valor de (X), considerou-se $d = 0,10$ e $m' = 0,05$

Note-se que todas as correlações para a otimização econômica do diâmetro independem do comprimento da tubulação.

2.6 - Algumas soluções de otimização econômica para casos particulares

Além das soluções discutidas anteriormente, que se aplicam a casos gerais, encontramos na literatura soluções para alguns casos particulares. Discutiremos abaixo duas soluções.

BODMAN [2] descreveu seu problema da seguinte forma:

"Como a demanda mundial de fertilizantes e ácido sulfúrico tem tornado-se cada vez maior, a necessidade de métodos de transporte de enxofre mais convenientes e econômicos tem-se tornado crítica. Este caso examina superficialmente diversos métodos alternativos de transporte, e fornece uma análise mais detalhada de um sistema de tubulações para transporte de enxofre líquido. A tubulação econômica é otimizada com respeito ao diâmetro do tubo condutor, pressão da linha, número de instalações de bombeio e espessura do isolamento. Um pequeno programa de computador é fornecido para facilitar os cálculos de dimensionamento. Os pontos econômicos da linha ótima são comparados com as outras técnicas de transporte possíveis".

Os seguintes itens de custo compõem o custo anual total da instalação: custo anual fixo do tubo, custo anual fixo de engenharia, custo anual fixo de instalação, custo anual fixo das estações de bombeio, custo anual operacional das estações de bombeio, custo anual de manutenção das estações de bombeio, custo anual do vapor (custos anuais fixo e variável), custo anual fixo do isolamento, custo anual operacional de bombas. Estes custos foram expressos como função do diâmetro interno do tubo (D), do comprimento (L) entre as estações de bombeio, da pressão máxima permitida na tubulação de enxofre (P), dos diâmetros externos da linha de vapor (D_s) e do isolamento (D_i), ou seja da espessura do isolante. Temos:

$$C_{tt} = h(P, L, D, D_s, D_i) \quad (2.47)$$

O autor expressou \underline{D}_s como uma função de \underline{D} , considerando uma certa espessura para a tubulação de enxofre. Então (2.47) fica:

$$C_{tt} = g(P, L, D, D_i) \quad (2.47a)$$

Fixou um valor para a espessura do isolamento, e expressou \underline{D}_i como função de \underline{D} . Logo (2.47a) tornou-se uma função apenas de \underline{P} , \underline{L} e \underline{D} . Por outro lado, a variável \underline{L} pode ser expressa como uma função de \underline{P} e \underline{D} . Portanto, a expressão final para o custo anual total fica:

$$C_{tt} = f(P, D) \quad (2.47b)$$

As condições de ótimo econômico são obtidas quando:

$$\begin{cases} \frac{\partial C_{tt}}{\partial P} = 0 \\ \frac{\partial C_{tt}}{\partial D} = 0 \end{cases} \quad (2.48)$$

Resolvendo-se o sistema (2.48), obtemos as soluções ótimas para: \underline{D}_o , \underline{P}_o e \underline{L}_o . O autor discute a influência dos seguintes itens nos custos anuais da instalação: efeito do número de estações de bombeio, efeito da espessura do isolamento, efeitos do diâmetro da tubulação para enxofre, efeitos da taxa de depreciação.

SHERWOOD [25] discutiu a possibilidade de se usar tubulação interestadual para transporte de gás natural liquefeito.

A operação de líquido requer um tubo menor e menores investimentos em bombas, mas a temperatura é menor e a carga de refrigeração muito alta. Primeiramente, procede-se a otimização

da tubulação para o gás. Quando isto é feito, a otimização para a linha de líquidos obtêm-se com um mínimo de cálculo adicional.

O principal resultado neste caso é a otimização da tubulação de gás com respeito ao diâmetro da tubulação, número de estações de compressão e pressão de operação".

Os cálculos para a otimização da linha de gás foram conduzidos como segue:

1 - Perda de carga - calculada usando a equação de Weymouth (2.49):

$$Q = 3,22 \frac{T_0}{P_0} \left[\frac{P_1^2 - P_2^2 D^5}{\rho' L f Z} \right]^{1/2} \quad (2.49)$$

onde:

Q = taxa de fluxo medida a (T_0, P_0) , pé^3 padrão/h

T_0 = temperatura de referência, $^{\circ}\text{R}$

T = temperatura, $^{\circ}\text{R}$

P_0 = pressão de referência, $^{\circ}\text{R}$

P_1 = pressão de saída da estação de compressão, psia

P_2 = pressão de entrada da estação de compressão, psia

D = diâmetro interno, polegadas

L = comprimento, pés ou milhas

ρ' = densidade relativa ao ar

Z = fator de compressibilidade para corrigir o desvio em relação ao comportamento de gás ideal

f = fator de fricção.

O fator de fricção (f) obedece a relação (2.50) para o caso de gás natural

$$f = 0,008/D^{1/3} \quad (2.50), \text{ é}$$

interessante ressaltar que não se trata de aproximação grosseira.

- 2 - Massa de aço - a massa de aço necessária à tubulação de transporte foi expressa em termos do diâmetro (D) e da pressão (P_1) através da relação (2.51):

$$DP_1 = 2 St \quad (2.51), \text{ onde:}$$

S = tensão permissível, lbf/pol²

t = espessura da parede do tubo, pol .

- 3 - Potência do compressor - calculada como função da taxa de compressão (r):

$$r = P_1/P_2 \quad (2.52)$$

- 4 - O custo da linha de gás inclui custos operacionais e custos fixos, e foi expresso como:

$$C_{tt} = f_1(D, P_1, L, r) \quad (2.53)$$

A variável P_1 foi eliminada usando a relação (2.49) aplicada às condições do problema e a relação (2.52). Então (2.53) fica:

$$C_{tt} = f_2(D, L, r) \quad (2.53a)$$

Os valores ótimos de D , L e r são obtidos quando:

$$\frac{\partial C_{tt}}{\partial D} = \frac{\partial C_{tt}}{\partial L} = \frac{\partial C_{tt}}{\partial r} = 0 \quad (2.54)$$

Para transporte do gás natural liquefeito os custos de refrigeração são maiores, porém requer-se um número menor de estações de

bombeio. Observou-se que os custos de refrigeração são tão elevados, que a possibilidade de reduzir os custos de bombeio no caso do líquido não resulta econômica. O autor concluiu que o transporte do gás natural liquefeito é economicamente impraticável com a tecnologia atual.

Um dos métodos clássicos utilizados para a resolução de sistemas do tipo (2.48 ou 2.54) é o método de ZENER [25]. O método está limitado a casos onde:

- o custo pode ser expresso como uma soma de termos, e cada um envolve um produto de potências das variáveis independentes (Vd_i),
- têm-se um termo a mais que o número de variáveis independentes,

ou seja:

$$\left\{ \begin{array}{l} C_{tt}(Vd_1, Vd_2, \dots, Vd_m) = \sum_{i=1}^n T_i \\ T_i = a_i \prod_{j=1}^m Vd_j^{\beta_{i,j}} \\ n = m + 1 \end{array} \right.$$

Os trabalhos aqui discutidos parecem justificar o estudo da otimização econômica do diâmetro de tubulações industriais, para condições brasileiras. A tabela 2.8 parece ser um forte argumento a demonstrar a necessidade deste gênero de estudos.

NOMENCLATURA^a

- B' : constante independente do diâmetro, adimensional.
 b : inclinação do gráfico log-log custo do tubo-diâmetro.
 C_1 : custo por pé linear do tubo de 1 polegada de diâmetro.
 C_2 : custo da energia elétrica, \$/kwh.
 C_f : custo anual do tubo, \$/ano.
 C_{ft} : custo anual total do cano, \$/vida útil.
 C_v : custo anual variável, \$/ano.
 C_{tt} : custo anual total, \$/ano.
 d : depreciação, fração do investimento (ou diâmetro no item 2.3.1).
 D : diâmetro do tubo, polegadas.
 D' : diâmetro do tubo, m.
 D_c : diâmetro corrigido. (pol.).
 D_e : diâmetro externo do tubo, m.
 D_i : diâmetro interno, m.
 D_f : diâmetro do tubo, pé.
 D_0 : diâmetro econômico., polegadas.
 D'_0 : " " , pé.
 D''_0 : " " , m.
 E : eficiência global do motor e bomba.
 e : rugosidade do tubo. (L).
 F : fator para acessórios e instalação, adimensional.
 F_c : fator de correção.
 h, h_1, h_2 : altura.
 h : horas de operação por ano.
 J : perda friccional devida a acessórios, expressa como comprimento equivalente.
 l : comprimento, pé.
 L' : comprimento, m.
 L'_e : perda friccional devida a acessórios, expressa como comprimento equivalente do tubo, $L'_e = J/D_0^5 (1/p\bar{e})$.
 m : fluxo mássico, 1000 lb/h (ou massa no item 2.3).
 M : fator que expressa o custo total da instalação de bombeio, em termos do custo anual de bombeio.

^a não estão incluídas as variáveis do item 2.6.

- m' : manutenção, expressa como uma fração do investimento.
 m'' : manutenção anual da instalação de bombeio.
 P : massa do tubo, kg.
 p : pressão máxima de trabalho, kgf/cm^2 .
 P_1, P_2 : pressão, (M/LT^2) .
 q : vazão, $\text{pē}^3/\text{s}$.
 q' : " , m^3/s .
 q'' : " , m^3/h .
 $q_{crit.}$: vazão crítica, $\text{pē}^3/\text{s}$.
 R : taxa de retorno (custo do capital antes do imposto) sobre o investimento incremental.
 S : custo do tubo, £/ton .
 S' : custo do quilograma de tubo instalado ($\text{\$/kg}$).
 s : tempo de vida da tubulação, s.
 t : espessura da parede do tubo, polegadas.
 t' : " " " , m.
 v_1, v_2, v' : velocidade (L/T).
 v : velocidade, $\text{pē}/\text{s}$.
 X : soma dos custos anuais do tubo de 1 polegada de diâmetro: depreciação, impostos sobre capital, seguros gerais da planta, e retorno sobre o investimento.
 Y : dias de operação por ano, expresso como dias de 24 horas.
 Z : viscosidade em centipoise.
 w : fluxo mássico, lb/s .
 ΔP_f : perda de carga, $\text{lb}_f/\text{pē}^2$.
 f : fator de fricção, adimensional.
 Re : número de Reynolds, adimensional.
 gc : fator de conversão, $32,2 (\text{pē}-\text{lb}/\text{s}) / (\text{lb}_f/\text{s})$.
 μ : viscosidade, $\text{lb}/\text{pē s}$.
 σ : tensão admissível, kgf/cm^2 .
 θ : fator para a taxa de imposto.
 ϵ : rugosidade relativa, adimensional.
 ρ : densidade do fluido, $\text{lb}/\text{pē}^3$.
 ρ' : " " , kg/m^3 .
 ρ_t : " do material, $\text{lb}/\text{pē}^3$.
 ρ_t' : " " , kg/m^3 .
 g : aceleração da gravidade. (M/T^2).

C A P I T U L O - 3

M A T E R I A I S E M É T O D O S

3.1 - Listas de Preços e Especificações Técnicas

O material utilizado na execução deste trabalho con
siste de:

- 1 - lista de preços de tubos de condução publicada pela ABITAM-
(Associação brasileira da indústria de tubos e acessórios de
metal) em fevereiro de 1979.
- 2 - Índices de reajustes permitidos pelo C.I.P. (Conselho Inter-
ministerial de Preços) de fevereiro de 1977 a fevereiro de 1979.
- 3 - lista de preços de tubos de aço inoxidável referente a março.
de 1979.

As tabelas 3.1 a 3.5 resumem as informações neces-
sárias.

Fazendo uso das especificações técnicas dos tubos
de condução indicados na tabela 3.1, podemos montar a tabela 3.4,
onde o custo está expresso em cruzeiros por metro de comprimento.

Tabela 3.1 - Preços de tubos de condução em fevereiro 1979 (CR\$/kg)

Conjunto(j)	1	2	3	4	5	6
NORMA	E.B. 182 LEVE PRETO	EB.182 LEVE Galvani- zado	E. 182 MÉDIO PRETO	E. 182 MÉDIO Galvani- zado	ASTM-A.120 "Sch.40" PRETO	ASTM-A.120 "Sch.40" Galvaniza- do
Ø (pol.)						
3/8	17,58	23,29	17,94	21,17	-	-
1/2	13,53	17,91	13,82	16,25	15,02	17,70
3/4	13,53	17,91	13,82	16,25	15,02	17,70
1	13,12	17,55	13,30	15,64	14,46	16,98
1.1/4	13,12	17,55	13,30	15,64	14,46	16,98
1.1/2	12,59	15,97	13,30	15,83	14,46	16,98
2	12,59	15,97	13,30	15,83	14,46	16,98
2.1/2	12,59	15,69	13,21	15,68	14,42	16,97
3	12,59	15,69	13,21	15,68	15,06	17,76
3.1/2	12,59	15,69	13,21	15,68	15,06	17,76
4	12,59	15,69	13,17	15,42	15,06	17,76
5	-	-	-	-	15,06	21,08
6	-	-	-	-	15,06	21,08

Tabela 3.2 - Índices de reajuste (p') para tubos de condução autorizados pelo C.I.P. (%)

Período	EB.182 leve		EB.182 leve		EB.182 médio		EB.182 médio		ASTM-A.120		ASTM-A.120	
	Preto		Galvanizado		Preto		Galvanizado		Sch 40 Preto		Sch 40 Galvanizado	
	$\phi \leq 1.1/4$	$\phi > 1.1/4$	$\phi \leq 1.1/4$	$\phi > 1.1/4$	$\phi \leq 1.1/4$	$\phi > 1.1/4$	$\phi \leq 1.1/4$	$\phi > 1.1/4$	$\phi \leq 1.1/4$	$\phi > 1.1/4$	$\phi \leq 1.1/4$	$\phi > 1.1/4$
Fevereiro 77	16,02	16,02	12,38	12,38	13,66	13,66	11,23	11,23	-	-	-	-
Maio 77	1,54	1,54	5,69	5,69	3,58	3,58	4,65	4,65	1,54	1,54	5,69	5,69
Setembro 77	13,26	13,26	10,20	10,20	11,22	11,22	9,36	9,36	13,26	13,26	10,20	10,20
Outubro 77	-	-	1,69	1,69	-	-	1,02	1,02	-	-	1,69	1,69
Dezembro 77	2,22	2,22	4,23	4,23	4,89	4,89	5,09	5,09	2,22	2,22	4,23	4,23
Fevereiro 78	2,30	2,30	4,50	4,50	3,33	3,33	3,57	3,57	2,30	2,30	4,50	4,50
Março 78	12,67	12,67	9,71	9,71	10,48	10,48	8,56	8,56	12,67	12,67	9,71	9,71
Maio 78	7,36	3,07	6,69	3,27	1,48	1,48	1,18	1,18	7,36	3,07	6,69	3,27
Julho 78	-	-	1,68	1,68	-	-	4,70	4,70	-	-	1,68	1,68
Outubro 78	16,48	16,48	12,78	12,78	13,81	13,81	10,99	10,99	16,48	16,48	12,78	12,78
Novembro 78	3,48	3,48	4,75	4,75	5,56	5,56	5,75	5,75	3,48	3,48	4,75	4,75
Fevereiro 79	0,95	0,95	4,23	4,23	4,43	4,43	7,87	7,87	0,95	0,95	4,23	4,23

(Ø) em polegadas

Tabela 3.3 - Preços de tubo de aço inoxidável sem costura, em março 1979 (CR\$/m)

NOR TA Ø (Pol)	Conjunto(j)													
	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	Sch. 10 304 L	Sch. 10 316 L	Sch. 40 304 L	Sch. 40 316 L	Sch. 80 304 L	Sch. 80 316 L	ISO-R-65 304	ISO-R-65 316						
1/4	444,47	688,72	518,12	794,31	633,58	836,80	500,43	658,06						
3/8	523,77	691,76	572,74	756,45	723,55	967,51	539,07	708,87						
1/2	626,68	827,68	784,86	1.036,62	1.002,41	1.323,96	699,62	920,00						
3/4	765,82	1.011,45	983,41	1.298,85	1.241,48	1.639,69	858,31	1.128,67						
1	1.174,59	1.551,35	1.374,24	1.815,03	1.753,24	2.315,58	1.246,96	1.639,76						
1-1/4	1.488,66	1.966,16	1.819,98	2.403,73	2.376,25	3.138,43	1.580,51	2.078,38						
1-1/2	1.720,41	2.272,25	2.172,76	2.869,69	2.864,38	3.783,14	1.818,52	2.391,36						
2	2.188,74	2.890,80	2.946,39	3.891,47	3.963,63	5.234,98	2.571,80	3.381,92						
2-1/2	2.951,69	3.898,46	4.588,85	6.060,76	6.067,79	8.014,05	3.334,28	4.384,57						
3	3.624,39	4.786,91	6.115,75	8.077,39	8.272,19	10.925,54	4.338,87	5.705,62						
3-1/2	4.246,19	5.608,17	7.441,83	9.828,82	10.221,68	13.500,33	-	-						
4	4.810,08	6.352,94	8.827,42	11.658,88	12.257,90	16.189,70	-	-						
5	7.317,59	9.664,74	12.308,96	16.257,12	17.485,51	23.094,06	-	-						
6	9.287,61	12.266,65	16.373,58	21.625,48	24.657,38	32.566,34	-	-						
8	17.403,80	22.986,16	30.636,88	40.463,81	42.632,70	56.307,31	-	-						

Tabela 3.4 - Preços de tubos de condução em CR\$/m de fevereiro de 1979

Conjunto (j)	6					
	1	2	3	4	5	6
NORMA	E.B. 182 Leve Preto	E.B. 182 Leve Galvani- zado	E.B. 182 Médio Preto	E.B. 182 Médio Galvani- zado	ASTM-A.120 "Sch.40" Preto	ASTM-A.120 "Sch.40" Galvaniza- do
Ø (pol.)						
3/8	13,19	18,61	15,50	19,33	-	-
1/2	14,91	20,81	16,85	20,78	24,36	30,73
3/4	19,32	26,94	21,90	26,99	32,88	41,44
1	29,78	41,51	31,52	38,55	46,69	58,67
1.1/4	38,18	53,18	40,57	49,58	64,56	81,13
1.1/2	42,18	55,69	46,68	57,73	78,11	98,14
2	59,17	77,79	66,10	81,38	108,03	135,74
2.1/2	75,67	97,67	83,88	102,94	164,84	207,00
3	99,08	127,42	110,70	135,33	229,67	289,81
3.1/2	113,94	146,50	127,21	155,50	280,34	353,74
4	145,16	185,97	160,54	192,95	335,69	423,58
5	-	-	-	-	553,49	697,43
6	-	-	-	-	760,96	958,89

Tabela 3.5 - Diâmetros internos de tubos de condução (pol)

Ø (pol)	E.B. 182 Leve	E.B. 182 Médio	ASTM "Sch 40"
1	1,091	1,079	1,049
1.1/4	1,433	1,421	1,380
1.1/2	1,665	1,654	1,610
2	2,110	2,094	2,067
2.1/2	2,732	2,717	2,469
3	3,205	3,185	3,068
3.1/2	3,705	3,685	3,548
4	4,165	4,146	4,026
5	-	-	5,047
6	-	-	6,065

3.2 - Um modelo para a equação de custo fixo

Desejamos determinar a função:

$$C = f(D) . \quad (3.1)$$

Faz-se uma análise preliminar das listas de preços disponíveis com o objetivo de verificar que tipo de modelo, para a equação de custo fixo, se adapta às condições brasileiras.

Consideremos a massa de material por unidade de comprimento do cano (M):

$$M = \frac{\pi}{4} (D_e^2 - D_i^2) \rho_t ,$$

$$M = \frac{\pi}{4} \cdot \rho_t (D_e + D_i) (D_e - D_i) ,$$

seja

$$t = \frac{(D_e - D_i)}{2} ,$$

$$(D_i + t) = \frac{D_e + D_i}{2} ,$$

$$M = \pi \rho_t (D_i + t) t \quad [\text{massa/unidade de comprimento}] .$$

Seja (C_0) o custo do material por unidade de massa. Então o custo por unidade de comprimento (C) fica:

$$C = \pi \rho_t (D_i + t) t C_0 \quad [\text{custo/unidade de comprimento}] \quad (3.2).$$

Para a aplicação do modelo (3.2), a variável (C_0) deve manter-se constante para todos os tamanhos de canos, em uma dada classe de tubos.

A análise preliminar indicou que equações do tipo (3.2) não se adaptam às condições brasileiras, pois a condição básica para sua aplicação não é obedecida.

Testaremos então o modelo:

$$C = C_1 D^\beta \quad (3.3), \text{ ou}$$

$$\ln C = \ln C_1 + \beta \ln D \quad (3.3a);$$

$$\text{seja } \begin{cases} Y = \ln C \\ X = \ln D \\ \alpha = \ln C_1 \end{cases}$$

assim (3.3a) fica:

$$Y = \alpha + \beta X \quad (3.3a'),$$

onde: C : custo do tubo (Cr\$/m),
 C_1 : custo do tubo de 1 polegada de diâmetro (Cr\$/m),
 D : diâmetro do tubo (pol).

Colocamos em gráfico, usando escala logarítmica, as variáveis C e D como mostra a figura 3.1.

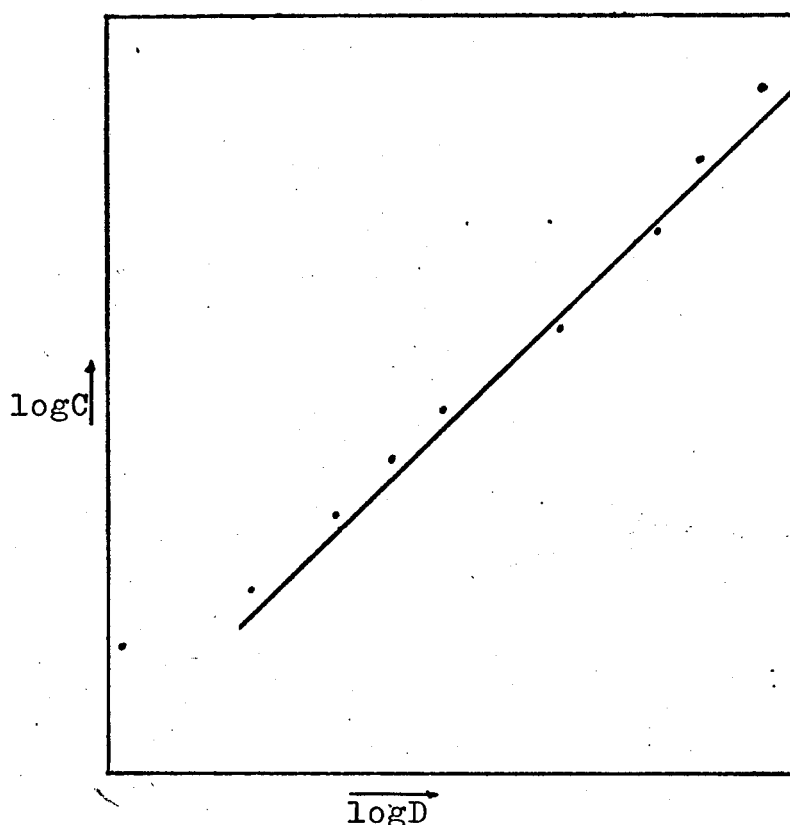


figura 3.1 - análise preliminar (C vs. D)

A figura 3.1 indica que o modelo (3.3a) parece, pelo menos à primeira vista, representar bem as relações entre C e D . Por outro lado, verificamos a existência de um "ponto de quebra" quando a variável D é igual a unidade. Podemos esperar que ou teremos duas retas, uma delas definida para valores da variável D menores que a unidade, e a outra definida para valores maiores ou igual à unidade; ou o modelo a ser testado aplica-se apenas a valores da variável D maiores ou igual à unidade. Resolvemos testar o modelo (3.3a) para três intervalos diferentes, ou seja:

Intervalo 1 : compreende todo o intervalo de definição da variável D .

Intervalo 2 : compreende todo o intervalo de definição da variável D para valores da variável maiores ou igual a unidade.

Intervalo 3 : compreende todo o intervalo de definição da variável para valores menores que unidade.

Assim poderemos ter a equação de custo fixo definida como:

$$C = f(D) \quad \text{para qualquer } D \quad (3.4a), \text{ ou}$$

$$\begin{cases} C = h(D) & \text{para } D \geq 1 \\ C = g(D) & \text{para } D < 1 \end{cases} \quad (3.4b)$$

A escolha entre (3.4a) e (3.4b) estará baseada na melhor resposta de ajuste da função.

3.3 - Análise do modelo proposto

Para testarmos o modelo (3.3a') devemos fazer uma análise de regressão das variáveis Y e X . O método de ajuste da função a ser empregado será o dos mínimos quadrado.

O primeiro passo para uma análise de regressão (*) é obter as estimativas a e b dos parâmetros α e β da regressão. Os valores destas estimativas serão obtidos a partir de uma amostra de k pares de valores (X_i, Y_i) ($i = 1, 2, \dots, k$), que correspondem a k pontos em um gráfico [13].

(*) todas as suposições necessárias para aplicação da análise de regressão foram assumidas como verdadeiras.

Temos então:

$$\hat{Y}_i = a + bX_i \quad (3.5), \text{ para}$$

cada par de valores (X_i, Y_i) podemos estabelecer o desvio (e_i) :

$$e_i = Y_i - \hat{Y}_i = Y_i - (a + bX_i) \quad (3.6), \text{ o}$$

método dos mínimos quadrados consiste em minimizar a soma dos quadrados dos desvios, ou seja minimizar

$$N(a,b) = \sum_{i=1}^k e_i^2 = \sum_{i=1}^k [Y_i - (a + bX_i)]^2 \quad (3.7)$$

obtem-se o mínimo da função $N(a,b)$ igualando a zero suas derivadas parciais em relação a a e b.

$$\frac{\partial N(a,b)}{\partial a} = -2 \sum_{i=1}^k [Y_i - (a + bX_i)] = 0 \quad (3.8a)$$

$$\frac{\partial N(a,b)}{\partial b} = 2 \sum_{i=1}^k [Y_i - (a + bX_i)](-X_i) = 0 \quad (3.8b)$$

Simplificando, chegamos ao sistema de equações

$$\left\{ \begin{array}{l} ka + b \sum_{i=1}^k X_i = \sum_{i=1}^k Y_i \\ a \sum_{i=1}^k X_i + b \sum_{i=1}^k X_i^2 = \sum_{i=1}^k X_i Y_i \end{array} \right. \quad (3.8a'),$$

$$(3.8b').$$

Essas equações são conhecidas como equações normais. Re solvendo o sistema, temos:

$$b = \frac{k \sum_{i=1}^k X_i Y_i - (\sum_{i=1}^k X_i)(\sum_{i=1}^k Y_i)}{k \sum_{i=1}^k X_i^2 - (\sum_{i=1}^k X_i)^2} \quad (3.9a),$$

$$a = \frac{(\sum_{i=1}^k X_i^2)(\sum_{i=1}^k Y_i) - (\sum_{i=1}^k X_i)(\sum_{i=1}^k X_i Y_i)}{k \sum_{i=1}^k X_i^2 - (\sum_{i=1}^k X_i)^2} \quad (3.9b), \text{ ou}$$

$$a = \bar{Y} - b\bar{X}. \quad (3.9b')$$

Lembrando que:

$$e_i = Y_i - \hat{Y}_i = Y_i - (a + bX_i) \quad (3.6), \text{ de}$$

(3.8a) concluímos que:

$$\sum_{i=1}^k e_i = 0 \quad (3.10a), \text{ de}$$

(3.8b) concluímos que:

$$\sum_{i=1}^k X_i e_i = 0 \quad (3.10b).$$

Temos também que:

$$\sum_{i=1}^k \hat{Y}_i e_i = \sum_{i=1}^k (a + bX_i) e_i = a \underbrace{\sum_{i=1}^k e_i}_0 + b \underbrace{\sum_{i=1}^k X_i e_i}_0$$

$$\sum_{i=1}^k \hat{Y}_i e_i = 0 \quad (3.10c).$$

Como $Y_i = \hat{Y}_i + e_i$, de (3.10a) concluímos que:

$$\frac{\sum_{i=1}^k Y_i}{k} = \frac{\sum_{i=1}^k \hat{Y}_i}{k} = \bar{Y} \quad (3.10d).$$

As relações (3.10a), (3.10b), (3.10c) e (3.10d) podem ser utilizadas para verificar se as estimativas dos parâmetros foram corretamente calculadas e o efeito de erros de arredondamento [13].

As seguintes medidas foram realizadas com o objetivo de analisar o comportamento do modelo ajustado:

1 - A variância ($\hat{\sigma}_r^2$), em termos das estimativas de mínimos quadrados, que é uma medida de quanto a variável Y está dispersa em relação a um certo valor fixado da variável X. A medida $\hat{\sigma}_r^2$ é expressa em unidades de Y ao quadrado.

$$\hat{\sigma}_r^2 = \frac{1}{k-2} \sum_{i=1}^k [Y_i - (a+bX_i)]^2 \quad (3.11)$$

2 - O desvio padrão ($\hat{\sigma}_r$), em termos das estimativas de mínimos quadrados a e b. A quantidade $\hat{\sigma}_r$ é medida em unidades de Y.

$$\hat{\sigma}_r = \left[\frac{1}{k-2} \sum_{i=1}^k [Y_i - (a+bX_i)]^2 \right]^{1/2} \quad (3.12)$$

3 - Coeficiente de variação (CV), mede a dispersão relativa das observações, pois por definição é o quociente entre a medida da dispersão dos pontos em torno da reta ($\hat{\sigma}_r$) e o valor médio da variável dependente (\bar{Y}). O resultado é tanto melhor quanto menor for o quociente de variação.

$$CV = \frac{\hat{\sigma}_r}{\bar{Y}} \quad (3.12)$$

4 - O coeficiente de determinação (R^2),

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^k (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2}{\sum_{i=1}^k (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (3.14)$$

A quantidade $(\sum_{i=1}^k (Y_i - \bar{Y})^2)$ é uma medida da variação de Y. Essa quantidade pode ser decomposta como:

$$\sum_{i=1}^k (Y_i - \bar{Y})^2 = \sum_{i=1}^k (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2 + \sum_{i=1}^k (Y_i - \hat{Y}_i)^2$$

A expressão $(\sum_{i=1}^k (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2)$ pode ser interpretada como a quantidade da variação de Y que é explicada pela regressão. A expressão $(\sum_{i=1}^k (Y_i - \hat{Y}_i)^2)$ é a soma dos quadrados dos resíduos e é devida ao fato de que nem todos os pontos (X_i, Y_i) estão sobre a reta de regressão, é a parte da variação de Y que não é explicada pela regressão. Então R^2 é a proporção da variação de Y que é explicada pela regressão.

5 - O coeficiente de correlação (r):

$$r = \frac{\sum_{i=1}^k (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^k (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^k (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (3.15)$$

é uma medida do grau de relação linear que existe entre a variável Y e a variável X .

Valores de r próximos de zero indicam baixa correlação linear, e valores de r próximos de 1 e -1 indicam forte relação linear. Pode-se demonstrar que:

$$r = \sqrt{R^2} \quad (3.16)$$

6 - Análise do gráfico de resíduos

Uma maneira de se verificar se existe desvio na suposição que a dispersão de Y para um valor de X fixado é a mesma, independente do valor de X (homocedasticidade), é colocar em gráfico os resíduos contra os valores ajustados (\hat{Y}).

Se o gráfico apresenta-se como o da figura 3.2, não temos razões para desconfiar que a hipótese de homocedasticidade não se verifica [10].

Podemos também graficar os resíduos contra a variável X . Aqui também se espera um gráfico como o da figura 3.2.

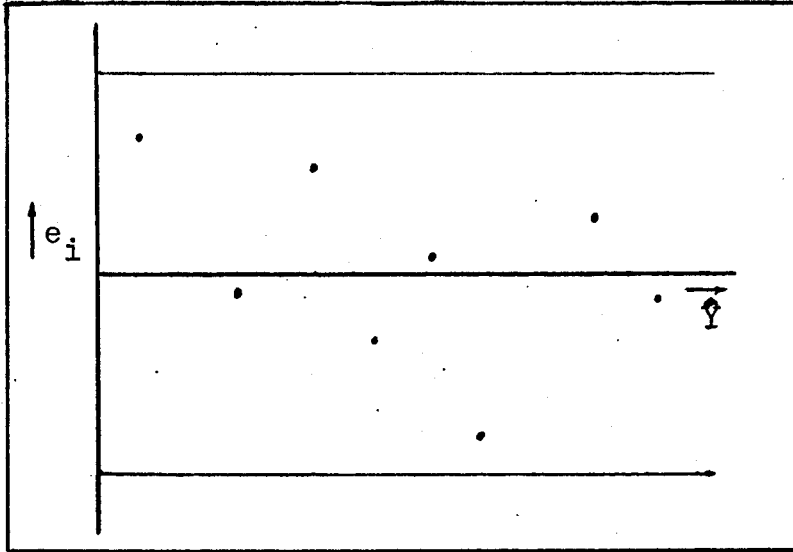


figura 3.2 - gráfico de resíduos(esperado)

Como podemos observar pelo modelo (3.3a), trabalhamos com logaritmos que são números que apresentam a parte decimal (ou mantissa) composta de muitos algarismos; por este motivo queremos verificar a significância dos algarismos na estimativa do parâmetro β (b). Resolvemos estabelecer um teste que nos possibilitasse limitar o número de algarismos necessários à parte decimal da estimativa \underline{b} . Sabemos de (3.10d) que:

$\bar{Y} = \bar{Y}$, então inicialmente calculamos os valores \bar{Y} e \bar{Y} , depois tomamos a estimativa \underline{b} com um número menor de algarismos na parte decimal e calculamos o valor \bar{Y}_j , quando:

$$|\bar{Y}_j - \bar{Y}| < 10^{-2} \quad (3.17), \text{ aceitamos}$$

que o valor da estimativa \underline{b} continha na parte decimal o número de algarismos necessários.

Até agora tratamos o modelo (3.3) de forma momentânea, temos também que analisar a influência da variável tempo sobre o modelo.

Aqui, devemos pensar um pouco nas listas de preço que estão sendo analisadas. Os reajustes de preços para tubos estão regulamentados pelo C.I.P. (Conselho Interministerial de Preços) e, durante os períodos analisados, verificamos que os reajustes apresentavam dois comportamentos:

- 1 - Os reajustes não variam para os diferentes diâmetros de tu bos em uma mesma classe,
- 2 - Os reajustes variam para os diferentes diâmetros de tubos de uma mesma classe.

Vamos em primeiro lugar analisar o comportamento tipo 1:

Consideremos que:

$p = (1 + p')$, reajuste permitido para uma certa classe de tubos no período (t_{i+1}) ,

C_i = preço dos tubos de uma certa classe, onde
($i = D_1, D_2, \dots, D$), no período (t_i) ,

C'_i = o preço dos tubos de uma certa classe, no período (t_{i+1}) .

Assim, temos que:

$$C'_i = (C_i)(p)$$

Lembrando (3.9a), temos:

$$b = \frac{k \sum_{i=1}^k X_i Y_i - \left(\sum_{i=1}^k X_i \right) \left(\sum_{i=1}^k Y_i \right)}{k \sum_{i=1}^k X_i^2 - \left(\sum_{i=1}^k X_i \right)^2} \quad (3.9a),$$

que pode ser escrito como:

$$b = \frac{\sum_{i=1}^k X_i (Y_i - \bar{Y})}{\sum_{i=1}^k (X_i - \bar{X})^2} \quad (3.9a')$$

De (3.3a) temos:

$$\begin{cases} Y = \ln C \\ X = \ln D \end{cases}$$

tomando $C = C' = (c)(p)$, e substituindo em (3.9a') temos:

$$b = \frac{\sum_{i=1}^k \ln D_i [(\ln C_i + \ln p) - (\sum_{i=1}^k (\ln C_i + \ln p))/k]}{\sum_{i=1}^k (\ln D_i - (\sum_{i=1}^k \ln D_i)/k)^2};$$

como $p = \text{constante}$, temos que $\ln p = \text{constante}$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^k \ln D_i [\ln C_i + \ln p - (k \ln p)/k - (\sum_{i=1}^k \ln C_i)/k]}{\sum_{i=1}^k (\ln D_i - (\sum_{i=1}^k \ln D_i)/k)^2},$$

então:

$$b = \frac{\sum_{i=1}^k \ln D_i [\ln C_i - (\sum_{i=1}^k \ln C_i)/k]}{\sum_{i=1}^k (\ln D_i - (\sum_{i=1}^k \ln D_i)/k)^2},$$

voltando a substituir $\ln C = Y$ e $\ln D = X$, temos:

$$b = \frac{\sum_{i=1}^k X_i (Y_i - \bar{Y})}{\sum_{i=1}^k (X_i - \bar{X})^2} \quad (3.18)$$

De (3.18) podemos afirmar que se os reajustes de preço tem comportamento tipo 1, a estimativa b, assim como os outros parâmetros utilizados na análise de regressão não variam à exceção da estimativa a, e portanto o modelo (3.3) não sofre qualquer influência do tempo.

Para os reajustes com comportamento tipo 2, verificamos a influência do tempo sobre (3.3), ajustando o modelo abaixo e testando a hipótese $H_0 : \beta_1 = 0$

$$b = \alpha_1 + \beta_1 t \quad (3.19)$$

onde t representa os períodos testados, ou seja ($t = 0, 1, \dots, k$). Se assumimos que os erros têm distribuição normal, mesma variância, e são não correlacionados, se $\beta_1 = 0$ o quociente:

$$F = \frac{\sum_{i=1}^k \hat{b}_i^2 - k \bar{b}^2}{\sum_{i=1}^k (b_i - \hat{b}_i)^2 / (k - 2)} \quad (3.20), \text{ tem}$$

distribuição F com 1 e $k - 2$ graus de liberdade. Então para testar a hipótese:

$H_0 : \beta_1 = 0$, ao nível de significância adotado, po-

demos utilizar a estatística F.

O procedimento consiste em rejeitar H_0 para todo F maior ou igual ao F crítico, com 1 e $k - 2$ graus de liberdade, relativo ao nível de significância adotado:

Assim, não rejeitar H_0 significa não rejeitar a hipótese da não influência do tempo em (3.3). Se a hipótese H_0 é rejeitada, analisaremos os dados disponíveis para verificar qual a importância do tempo sobre (3.3), e verificar se (3.19)

é um bom modelo para explicar as possíveis influências do tempo sobre (3.3).

3.4 - Custo variável

Consideremos a equação (2.11)

$$\Delta P_a = f \rho \frac{v^2 \ell}{2d} = f \rho \left(\frac{4q}{\pi d^2} \right)^2 \frac{\ell}{2d} \quad (2.11), \text{ em}$$

termos do Sistema Internacional de Unidades (kg, m, s) a energia consumida durante o escoamento de um fluido incompressível, por metro de comprimento do tubo e por ano fica:

$$W = (H) (3600) (q) (\Delta P_a / \ell) \quad (3.21)$$

Se $\begin{cases} Q = 3600q \\ C_2 = \text{custo da energia em CR\$/kwh,} \end{cases}$

o custo variável anual será:

$$C_v = \frac{(C_2/E) (H) (Q) (\Delta P_a / \ell)}{3,6 \times 10^6} \quad (\text{CR\$/ano}) \quad (3.22)$$

Para escoamento em regime laminar, aplica-se a equação (2.12), e de (2.11) e (3.22) temos:

$$C_v = \frac{(3,14 \times 10^{-9}) (C_2/E) (H) (\mu) (Q^2)}{d^4} \quad (3.23)$$

Para escoamento turbulento consideremos duas situações:

1 - que a equação (2.22) seja obedecida, então o custo variável anual fica:

$$C_v = \frac{(9,92 \times 10^{-15}) (C_2/E) (H) (\mu^{0,16}) (\rho^{0,84}) (Q^{2,84})}{d^{4,84}} \quad (3.24)$$

2 - que a equação de Colebrook (2.14) seja utilizada, neste caso a solução será obtida para uma situação particular, ou seja:

- a - escolheremos um fluido, teremos então ρ e μ determinados,
- b - tomaremos diferentes valores para Q e d , e resolveremos (2.14) por iteração determinando o valor de f ,
- c - substituiremos f em (2.11) determinando assim, $\Delta P_a/l$,
- d - substituiremos $\Delta P_a/l$ em (3.22), teremos então C_v como função de H e C_2/E , para a condição fixada.

A primeira tentativa para determinação de f estará baseada em:

$$f_0 = 0,0223 D^{-0,2225} \quad (3.25), \text{ pro}$$

posta por CAPLAN [4].

O método iterativo consiste em: para um R_e e $\epsilon = e/d$

fixados, usando (f_i) , calcula-se (f_{i+1}) ($i = 0, 1, \dots$), até que

$$|f_{i+1} - f_i| < 10^{-5}, \quad \text{tomando-se}$$

então

$$f = \frac{f_{i+1} + f_i}{2} \quad (3.26), \quad a$$

aproximação obtida estará dentro dos limites de incerteza previstos para o fator de fricção.

3.5 - Custo anual total e custo anual mínimo

Se podemos expressar os custos anuais fixo e variável como função de D temos:

$$C_{tt} = f(D) + h(D) \quad , \text{o mínimo}$$

obtêm-se quando:

$$\frac{d C_{tt}}{d(D)} = f'(D) + h'(D) = 0 \quad (3.27)$$

No escoamento turbulento, quando calculamos f usando (2.14), determina-se o custo anual mínimo comparando-se os resultados obtidos para diferentes D quando Q esta fixada.

3.6 - Critério para determinação do regime de escoamento

Consideremos o número de Reynolds crítico (R_{ec}):

$$R_{ec} = 2100 = \frac{\rho d v}{\mu} = \frac{4 q \rho}{\pi \mu d} \quad (3.28)$$

Resolvendo (3.27) para D_o , quando o escoamento é laminar temos:

$$D_o = g(\mu, Q, K) \quad (3.29), \text{ onde}$$

K é função das variáveis econômicas.

Lembrando que d e D_o representam a mesma quantidade expressa em unidades diferentes, podemos determinar Q resolvendo (3.27) e (3.28) eliminando o diâmetro. A resposta representa a taxa de fluxo crítica (Q_c) para as condições de trabalho, ou seja, quando:

$$Q_{\text{trabalho}} > Q_c \quad (3.30), \text{ usare}$$

mos escoamento turbulento.

$$Q_{\text{trabalho}} < Q_c \quad (3.31), \text{ usare}$$

mos escoamento laminar.

A taxa de fluxo crítica não é função apenas das características do fluido, mas também das variáveis econômicas.

NOMENCLATURA^a

C : custo do tubo, Cr\$/m.

C_1 : custo do tubo de 1 polegada de diâmetro, Cr\$/m.

C_v : custo anual variável, Cr\$/ano (por metro de tubo).

C_f : custo anual fixo, Cr\$/ano (por metro de tubo).

C_{tt} : custo anual total, Cr\$/ano (por metro de tubo)

D : diâmetro, polegadas.

D_e : diâmetro externo, m.

D_i : diâmetro interno, m.

d : diâmetro, m.

e : rugosidade do tubo, m.

E : eficiência global da bomba e motor, adimensional.

H : horas de operação por ano.

l : comprimento, m.

M : massa, m.

ΔP_a : perda de carga, N/m².

Q : taxa de fluxo, m³/h.

q : taxa de fluxo, m³/s.

t : espessura da parede do tubo, m.

v : velocidade, m/s.

ρ : densidade, kg/m³.

ρ'_t : densidade do material.

μ : viscosidade, kg/m.s..

ϵ : rugosidade relativa, adimensional.

B : constante, adimensional.

(\wedge): valor estimado

($\bar{\quad}$): valor médio

^a somente a não definida no texto.

C A P I T U L O - 4

RESULTADOS

4.1 - Equações para custo fixo

Consideremos o modelo (3.3) referido no capítulo anterior:

$$C = C_1 D^\beta \quad (3.3), \quad \text{como}$$

já foi mencionado anteriormente, podemos expressar (3.3) como:

$$Y = \alpha + \beta X \quad (3.3a') \quad \text{onde}$$

$$\begin{cases} Y = \ln C \\ X = \ln D \\ \alpha = \ln C_1 \end{cases}$$

Inicialmente, vamos verificar como se comportam os pares de valores indicados na tabela 3.4, quando ajustados ao modelo (3.3a').

Sabemos que a variável D é uma variável discreta, porém consideremos como uma variável contínua, supondo que os pares (X_i, Y_i) gerados a partir dos valores indicados na tabela 3.4 constituem o conjunto de pares experimentalmente observados. Com a restrição mencionada, podemos aplicar o método dos mínimos quadrados ao nosso conjunto de dados, e verificar o comportamento do modelo (3.3a').

Aplicando o método dos mínimos quadrados, obtemos as estimativas a e b dos parâmetros α e β . Determinamos o coeficiente de determinação (R^2) e o coeficiente de correlação (r). Os resultados obtidos são mostrados na tabela 4.1, onde j refere-se a cada um dos conjuntos de dados indicados na tabela 3.4.

Tabela 4.1 - Resultados da aplicação dos mínimos quadrados aos pares (X_i, Y_i) gerados a partir da tabela 3.4.

J \ estimativas	1	2	3	4	5	6
a	3,416189	3,727223	3,526505	3,734372	3,902003	4,132011
b	1,0361	0,9886	1,0236	1,0150	1,4123	1,4129
R ²	0,9870	0,9862	0,9832	0,9831	0,9850	0,9848
r	0,9935	0,9931	0,9916	0,9915	0,9925	0,9924

Tabela 4.2 - Resultados da aplicação dos mínimos quadrados aos pares (X_i, Y_i) gerados a partir da tabela 3.4 para valores de $D \geq 1$

J \ estimativas	1	2	3	4	5	6
a	3,348074	3,673839	3,416299	3,624109	3,748937	3,976706
b	1,1228	1,0584	1,1577	1,1494	1,5471	1,5496
R ²	0,9918	0,9862	0,9954	0,9968	0,9916	0,9916
r	0,9959	0,9931	0,9977	0,9984	0,9958	0,9958

Observando os valores de $\underline{R^2}$, verificamos que cêrca de 98,5% da variação do custo (C) em função do diâmetro (D) pode ser explicada através da regressão da variável \underline{Y} em \underline{X} .

Se nos referirmos novamente a tabela 3.4, observamos que alguns valores da variável \underline{D} poderiam ser omitidos se esta omissão representasse um ganho favorável para o ajuste. Estamos nos referindo aos valores de \underline{D} menores que a unidade, pois que representam valores de pouco ou nenhum interesse prático ao nível da proposta deste trabalho. Assim, eliminando os pares (X_i, Y_i) gerados para valores da variável \underline{D} menores que a unidade, e aplicando o método dos mínimos quadrados aos pares (X_i, Y_i) restantes obtemos os resultados mostrados na tabela 4.2.

Os resultados, mostrados na tabela 4.2, indicam um ganho favorável para o ajuste quando os valores de $(D < 1)$ foram eliminados. Façamos porém, uma análise mais detalhada.

Consideremos, agora, o modelo (3.3) em termos das estimativas \underline{a} e \underline{b} , temos então:

$$\hat{C} = A_0 D^b \quad (4.1), \text{ onde}$$

A_0 = antilogaritmo de \underline{a} ,

\hat{C} = custo estimado do tubo por metro de comprimento,

D = diâmetro nominal do tubo (pol.).

Lembremos que a quantidade $\underline{A_0}$ representa a estimativa do custo do tubo, quando a variável \underline{D} é igual a unidade. Podemos

escrever, com os resultados das tabelas 4.1 e 4.2 as equações indicadas na tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Equações para estimação de custo, obtidas com os resultados das tabelas 4.1 e 4.2

j	tabela 4.1	eq. n°	tabela 4.2	eq. n°
1	$\hat{C} = 30,45 D^{1,0361}$	(4.2)	$\hat{C} = 28,45 D^{1,1228}$	(4.8)
2	$\hat{C} = 41,56 D^{0,9886}$	(4.3)	$\hat{C} = 39,40 D^{1,0584}$	(4.9)
3	$\hat{C} = 34,00 D^{1,0236}$	(4.4)	$\hat{C} = 30,46 D^{1,1577}$	(4.10)
4	$\hat{C} = 41,86 D^{1,0150}$	(4.5)	$\hat{C} = 37,49 D^{1,1494}$	(4.11)
5	$\hat{C} = 49,50 D^{1,4123}$	(4.6)	$\hat{C} = 42,47 D^{1,5471}$	(4.12)
6	$\hat{C} = 62,30 D^{1,4129}$	(4.7)	$\hat{C} = 53,34 D^{1,5496}$	(4.13)

Usando as equações acima, vamos determinar as estimativas de custo do tubo por metro de comprimento. Estas estimativas são indicadas na tabela 4.4.

Comparemos agora os custos estimados (tabela 4.4) com os custos reais (tabela 3.4), para tanto vamos definir a quantidade E' , ou desvio percentual como:

$$E' = \frac{|C - \hat{C}|}{C} \times 100 \quad (4.14), \text{ os valores}$$

calculados de E' são mostrados na tabela 4.5.

Tabela 4.4 - Estimativas de custo usando as equações (4.2) a (4.13) (CR\$/m) (*)

j	1		2		3		4		5		6	
	Eq. n°	(4.2)	(4.3)	(4.9)	(4.4)	(4.10)	(4.5)	(4.11)	(4.6)	(4.12)	(4.7)	(4.13)
σ_n (pol.)		(4.8)										
3/8	11,02	-	15,76	-	12,46	-	15,47	-	-	-	-	-
1/2	14,85	-	20,94	-	16,72	-	20,71	-	18,60	-	23,40	-
3/4	22,60	-	31,27	-	25,33	-	31,26	-	32,97	-	41,50	-
1	30,45	28,45	41,56	39,40	34,00	30,46	41,86	37,50	49,50	42,47	62,30	53,31
1.1/4	38,37	36,55	51,82	49,90	42,72	39,44	52,80	48,45	67,84	60,00	85,40	75,37
1.1/2	46,35	44,85	62,05	60,52	51,50	48,71	63,17	59,75	87,76	79,53	110,48	100,00
2	62,44	61,96	82,47	82,06	69,12	67,96	84,59	83,16	131,75	124,11	165,90	156,15
2.1/2	78,70	79,60	102,82	103,91	86,86	87,99	106,10	107,48	180,56	175,28	227,37	220,65
3	95,05	97,68	123,13	126,03	104,68	108,67	127,67	132,53	233,58	232,40	294,18	292,68
3.1/2	111,51	116,13	143,40	148,37	122,57	129,90	149,30	158,22	290,40	295,00	365,76	371,66
4	128,05	134,92	163,63	170,90	140,52	151,61	171,00	184,47	350,67	362,68	441,76	457,10
5	-	-	-	-	-	-	-	-	480,57	512,22	605,43	646,00
6	-	-	-	-	-	-	-	-	621,71	679,14	783,32	857,80

(*) estamos usando estas aproximações apenas para facilitar a comparação

4.5 - Desvios percentuais (E')

j	1		2		3		4		5		6			
	Equação nº	(4.2) (4.8)	(4.3) (4.9)	(4.4) (4.10)	(4.5) (4.11)	(4.6) (4.12)	(4.7) (4.13)	Equação nº	(4.2) (4.8)	(4.3) (4.9)	(4.4) (4.10)	(4.5) (4.11)	(4.6) (4.12)	(4.7) (4.13)
3/8	16,5	-	15,3	-	19,6	-	20,0	-	-	-	-	-	-	-
1/2	0,4	-	0,6	-	0,8	-	0,3	-	-	-	-	-	23,6	23,9
3/4	17,0	-	16,1	-	15,7	-	15,8	-	-	-	-	-	0,3	0,1
1	2,2	4,5	0,1	5,1	7,9	3,4	8,6	2,7	6,0	9,0	6,2	9,1	6,0	6,2
1.1/4	0,5	4,3	2,6	6,2	5,3	2,8	6,5	2,3	5,1	7,1	5,3	7,1	5,1	5,3
1.1/2	9,9	6,3	11,4	8,7	10,3	4,3	9,4	3,5	12,4	1,8	12,6	1,9	12,4	12,6
2	5,5	4,7	6,0	5,5	4,6	2,8	3,9	2,2	22,0	14,9	22,2	15,0	22,0	22,2
2.1/2	4,0	5,2	5,3	6,4	3,6	4,9	3,1	4,4	9,5	6,3	9,8	6,6	9,5	9,8
3	4,1	1,4	3,4	1,1	5,4	1,8	5,7	2,1	1,7	1,2	1,5	1,0	1,7	1,5
3.1/2	2,1	1,9	2,1	1,3	3,6	2,1	4,0	1,7	3,6	5,2	3,4	5,1	3,6	3,4
4	11,8	7,1	12,0	8,1	12,5	5,6	11,4	4,4	4,5	8,0	4,3	7,9	4,5	4,3
5	-	-	-	-	-	-	-	-	13,2	7,5	13,2	7,4	13,2	13,2
6	-	-	-	-	-	-	-	-	18,3	10,8	18,3	10,6	18,3	18,3

Os resultados das tabelas 4.2 e 4.5 mostram claramente que o ajuste tem um ganho favorável quando eliminamos os pares (X_i, Y_i) gerados para valores da variável \underline{D} menores que a unidade. Além disso podemos observar, pelos resultados da tabela 4.5, que a dispersão dos pontos observados em torno da reta estimada é menor na segunda alternativa, ou seja, a que elimina os valores de \underline{D} menores que a unidade. Embora para alguns pontos o desvio (E') seja maior no segundo caso, as variações em média são menores, favorecendo assim este caso.

Foi mencionado que, os valores de \underline{D} menores que a unidade têm um interesse muito restrito, assim, os resultados até aqui obtidos justificam o prosseguimento do estudo considerando-se que, o conjunto de pares (X_i, Y_i) experimentais foram gerados para valores de \underline{D} maiores ou igual a unidade.

Até aqui, fizemos apenas um ajuste de modelo (3.3a') aos pares (X_i, Y_i) observados, vamos então iniciar a análise de regressão ou continuá-la, visto que as medidas \underline{R}^2 e \underline{r} já foram realizadas.

Segundo a metodologia descrita no capítulo 3, devemos ainda medir as quantidades: variância em termos das estimativas de mínimos quadrados ($\hat{\sigma}_r^2$), o desvio padrão ($\hat{\sigma}_r$), o coeficiente de variação (CV), os desvios (e_i) e as estimações (\hat{Y}_i) para análise do gráfico de resíduos. A tabela 4.6 resume os valores estimados para as medidas mencionadas acima.

A quantidade \underline{r} está bem próxima da unidade, indicando assim que o grau de correlação linear entre as variáveis de regressão \underline{X} e \underline{Y} é muito alto. Por outro lado a quantidade \underline{R}^2 também é bastante elevada, indicando que para o melhor ajuste ($j = 4$) a regressão explica 99,68% da variação de \underline{Y} , e no pior caso ($j = 2$) indica que a regressão explica tanto quanto 98,62%.

As quantidades $\hat{\sigma}_r^2$ e $\hat{\sigma}_r$ são muito pequenas indicando assim, baixa dispersão dos pontos observados em torno da reta ajustada. Como a precisão da estimativa de \underline{Y} cresce com o

Tabela 4.6 - Estimativas obtidas para as retas de regressão

j estimativas	→					
	1	2	3	4	5	6
a	3,348074	3,673839	3,416299	3,624109	3,748937	3,976706
b	1,1228	1,0584	1,1577	1,1494	1,5471	1,5496
$\hat{\sigma}_r^2$	0,003060	0,004636	0,001814	0,001262	0,008174	0,008177
$\hat{\sigma}_r$	0,055318	0,068088	0,042593	0,035525	0,090413	0,090429
\bar{Y}	4,186791	4,464391	4,281091	4,482674	5,199629	5,429755
CV	0,013213	0,015251	0,009949	0,007925	0,017388	0,016654
R ²	0,9918	0,9862	0,9954	0,9968	0,9916	0,9916
r	0,9959	0,9931	0,9977	0,9984	0,9958	0,9958

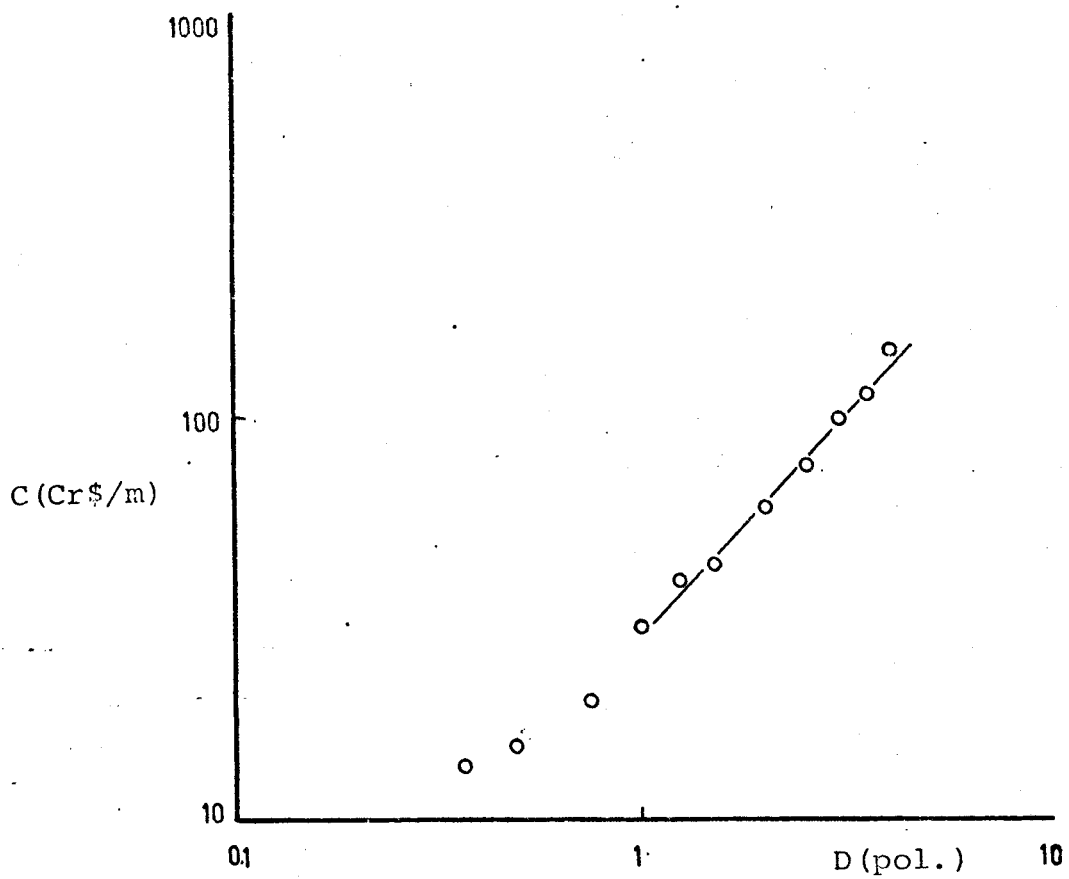


fig.4.1 - reta estimada : conjunto(j=1)

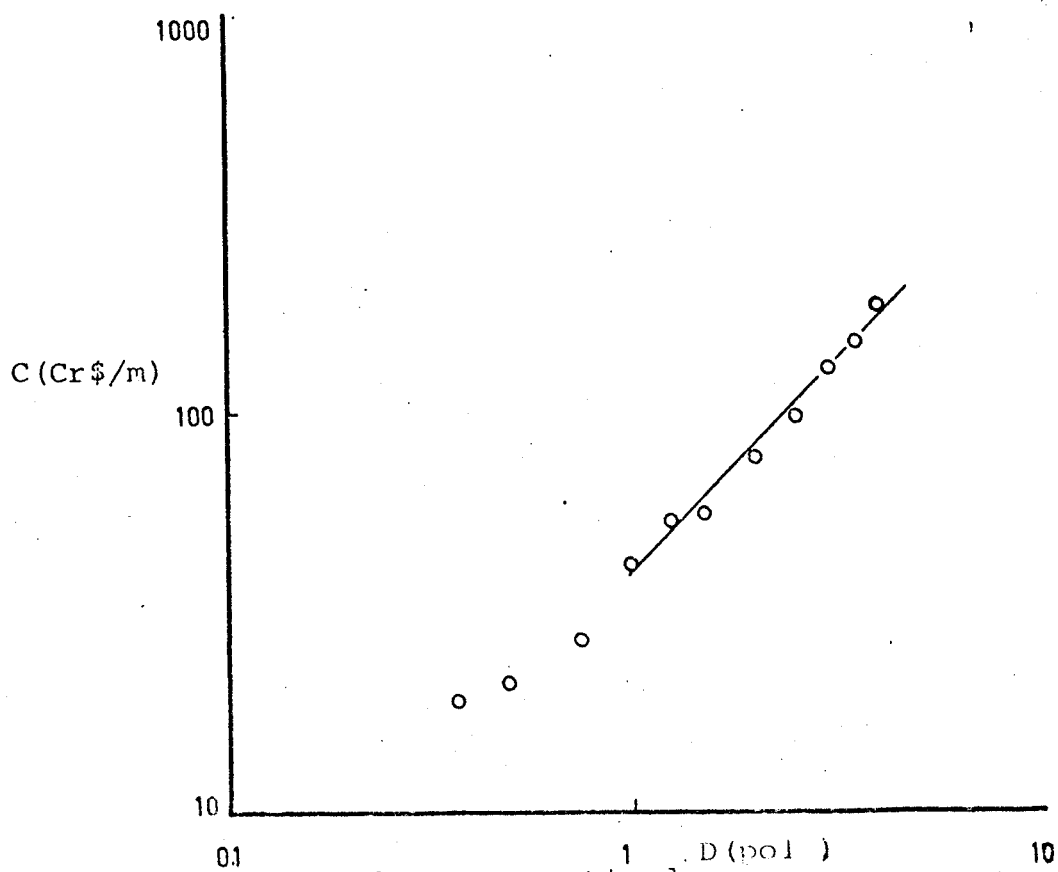


fig.4.2 - reta estimada : conjunto(j=2)

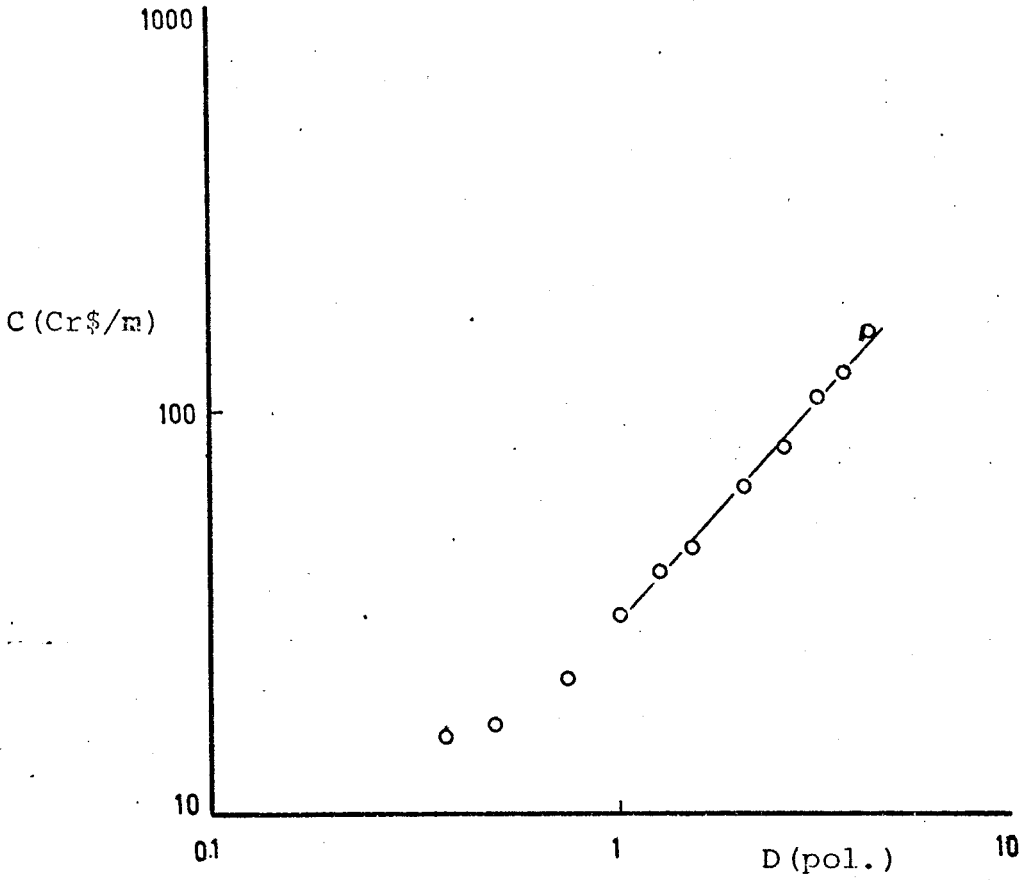


fig.4.3 - reta estimada : conjunto(j=3)

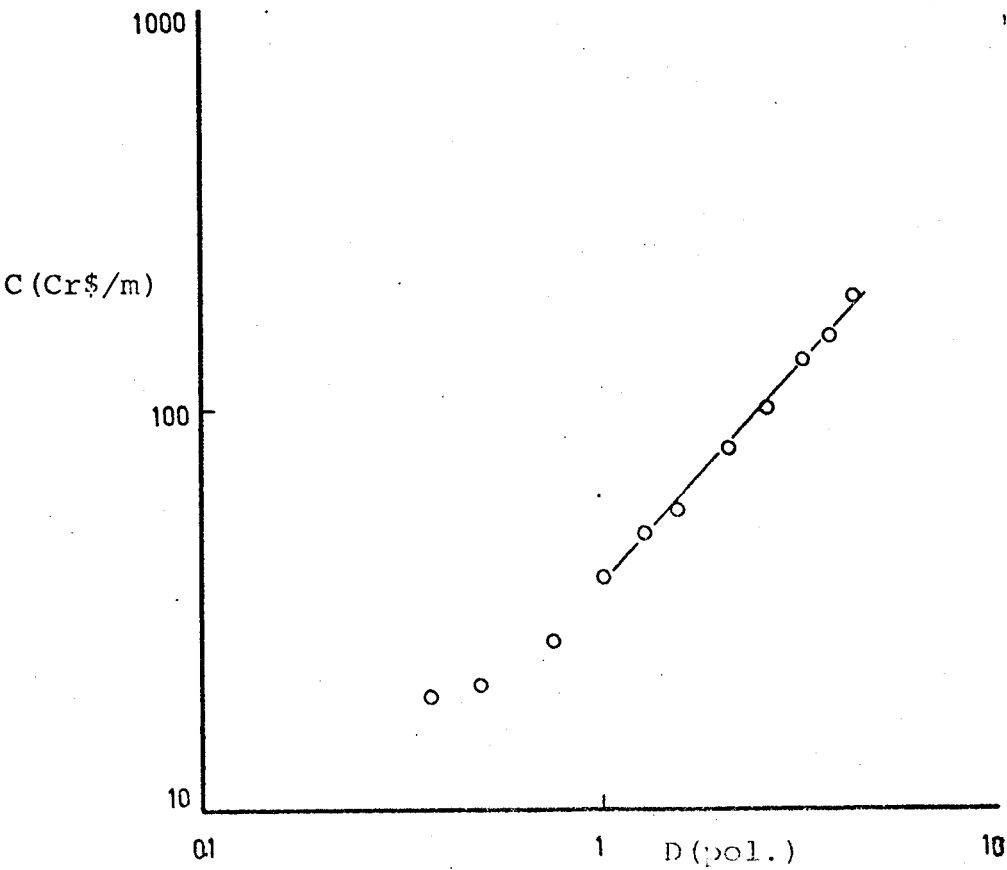


fig.4.4 reta estimada : conjunto(j=4)

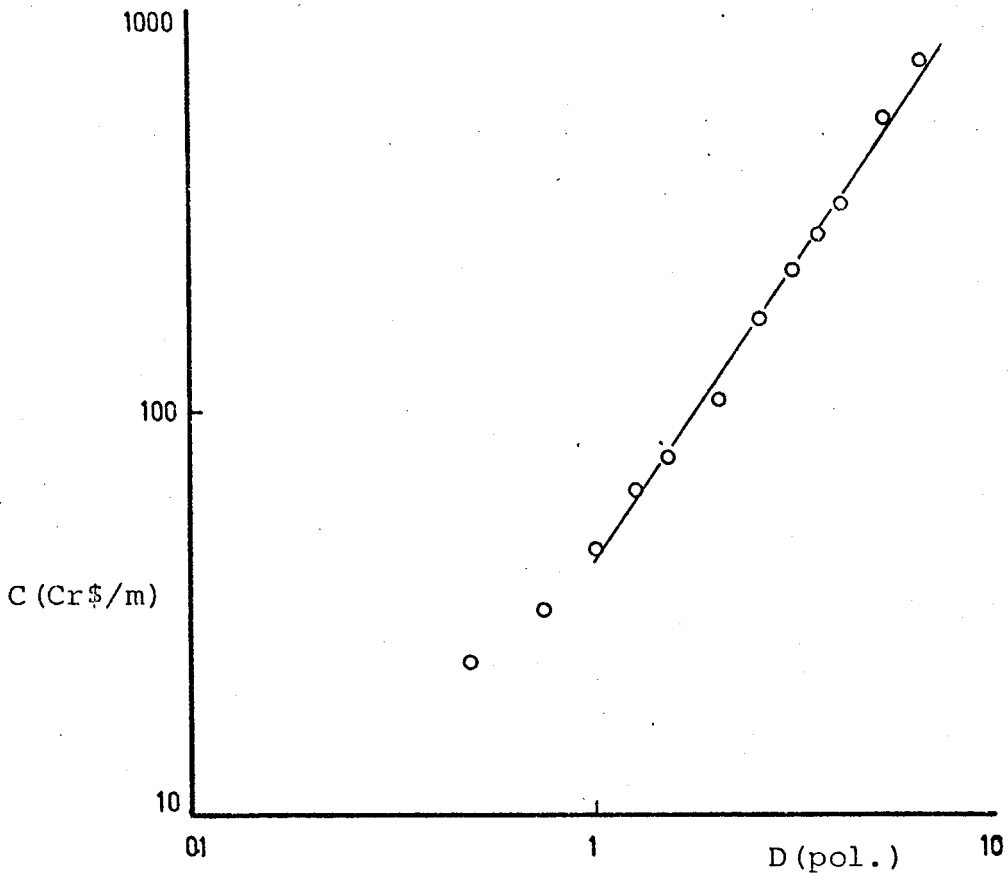


fig.4.5 - reta estimada : conjunto(j=5)

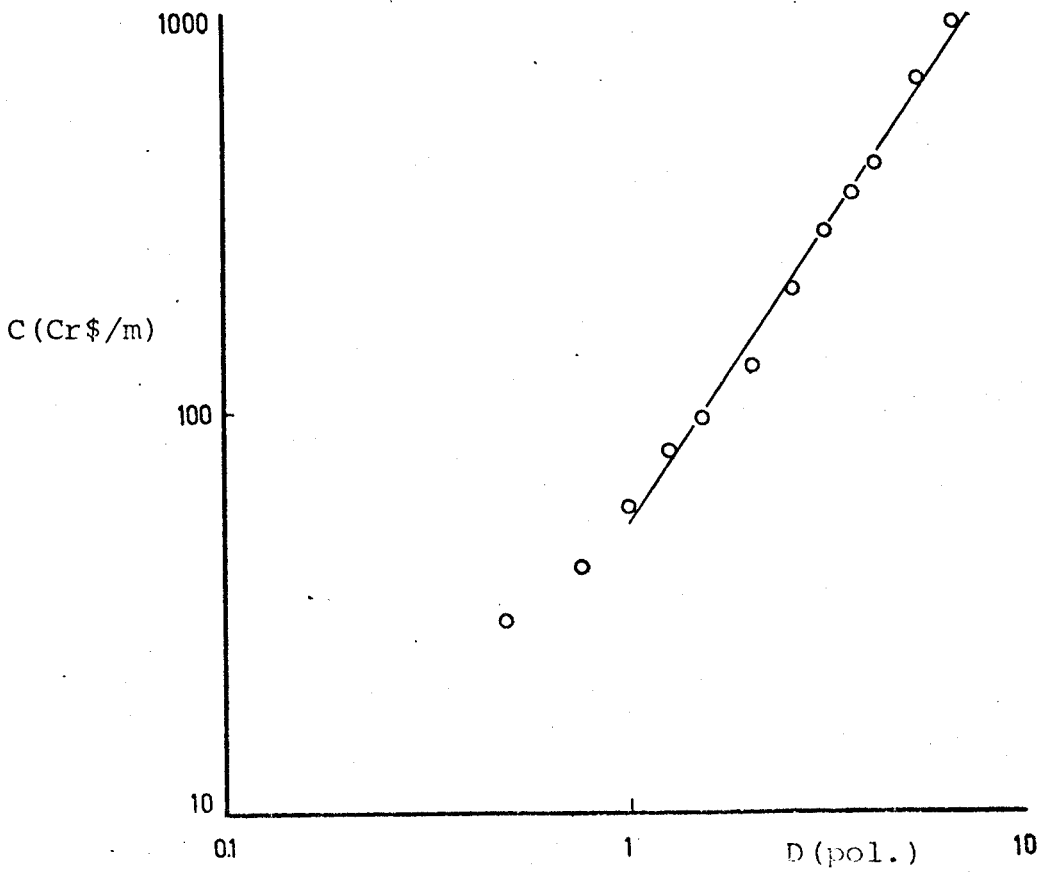


fig.4.6 - reta estimada : conjunto(j=6)

decrêscimo de $\hat{\sigma}_r$, os baixos valores estimados de $\hat{\sigma}_r$ indicam uma elevada precisão na estimativa de \underline{Y} . Por outro lado a quantidade de \underline{CV} muito baixa, vem indicar uma alta qualidade de ajustamentos dos pontos à reta.

As figuras 4.1 a 4.6 mostram as retas estimadas para cada conjunto de pares (X_i, Y_i) gerados a partir da tabela 3.4.

Ao se fazer uma análise de regressão, supõe-se que a dispersão de \underline{Y} para um valor fixado de \underline{X} é a mesma, independente do valor de \underline{X} fixado (homocedasticidade). Vamos agora verificar o comportamento dos nossos dados frente a esta hipótese. Os dados necessários a esta análise são mostradas na tabela 4.7 e nas figuras 4.7 a 4.12.

Observando as figuras 4.7 a 4.12, verificamos que os pontos estão bem dispersos e contidos em um certo intervalo. Podemos concluir que ocorre homocedasticidade, ou seja a dispersão de \underline{Y} é a mesma independente do valor de \underline{X} considerado.

Determinaremos agora o número de algarismos necessários à parte decimal da estimativa \underline{b} .

Lembrando (3.10d) temos que:

$$\bar{Y} = \bar{Y} \quad (3.10d)$$

Vamos montar a tabela 3.8, para verificar a influência de aproximações no valor médio de \underline{Y} .

Observando a tabela 4.8, podemos verificar que o uso da estimativa \underline{b} com aproximação de centésimos nos conduz a um erro medido através da estimação \bar{Y} menor que um centésimo. Este erro também pode ser medido através da estimação do custo (C).

Consideremos o caso ($j = 3$). As equações para estimação do custo (C) para diferentes aproximações da estimativa \underline{b} ficam:

$$\hat{C} = 30,46 D^{1,1577} \quad (4.10)$$

Tabela 4.7 - Dados para a análise de resíduos

g (pol)	j →	1	2	3
1	e	-0,045763	-0,052095	-0,034323
	\hat{Y}	3,348074	3,673839	3,416299
1.1/4	e	-0,043684	-0,063679	-0,028387
	\hat{Y}	3,598627	3,910004	3,674642
1.1/2	e	0,061398	0,083163	0,042407
	\hat{Y}	3,803344	4,102964	3,885723
2	e	0,045948	0,053420	0,027616
	\hat{Y}	4,126363	4,407433	4,218785
2.1/2	e	0,050534	0,062003	0,047740
	\hat{Y}	4,376916	4,643597	4,477127
3	e	-0,014295	-0,010931	-0,018615
	\hat{Y}	4,581633	4,836557	4,688209
3.1/2	e	0,019046	0,012678	0,020836
	\hat{Y}	4,754718	4,999703	4,866675
4	e	-0,073185	-0,084559	-0,057273
	\hat{Y}	4,904652	5,141026	6,021270
5	e	-	-	-
	\hat{Y}	-	-	-
6	e	-	-	-
	\hat{Y}	-	-	-

Tabela 4.7 - Dados para a análise de resíduos (Cont.)

μ (pol)	j →	4	5	6
1	e	-0,027847	-0,094593	-0,095223
	\hat{y}	3,624109	3,748937	3,976706
1.1/4	e	-0,022996	-0,073435	-0,073563
	\hat{y}	3,880591	4,094160	4,322490
1.1/2	e	0,034376	0,018109	0,018620
	\hat{y}	4,090152	4,376227	4,605016
2	e	0,021686	0,138888	0,140067
	\hat{y}	4,420816	4,821297	5,050808
2.1/2	e	0,043152	0,061545	0,063873
	\hat{y}	4,677298	5,166520	5,396592
3	e	-0,020857	0,011944	0,009892
	\hat{y}	4,886859	5,448588	5,679118
3.1/2	e	0,017395	0,051069	0,049428
	\hat{y}	5,064041	5,687073	5,917990
4	e	-0,044909	0,077469	0,076168
	\hat{y}	5,217523	5,893657	6,124911
5	e	-	-0,077363	-0,076708
	\hat{y}	-	6,238880	6,470694
6	e	-	-0,113633	-0,112556
	\hat{y}	-	6,520948	6,753220

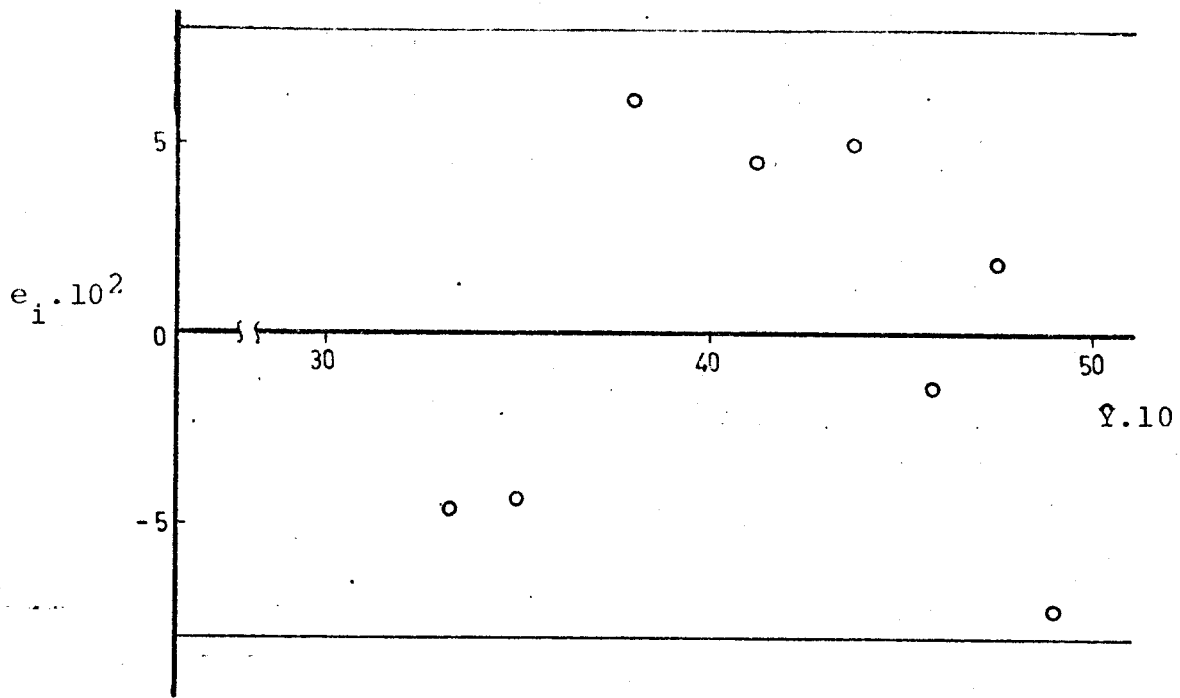


fig.4.7 - análise de resíduos : conjunto(j=1)

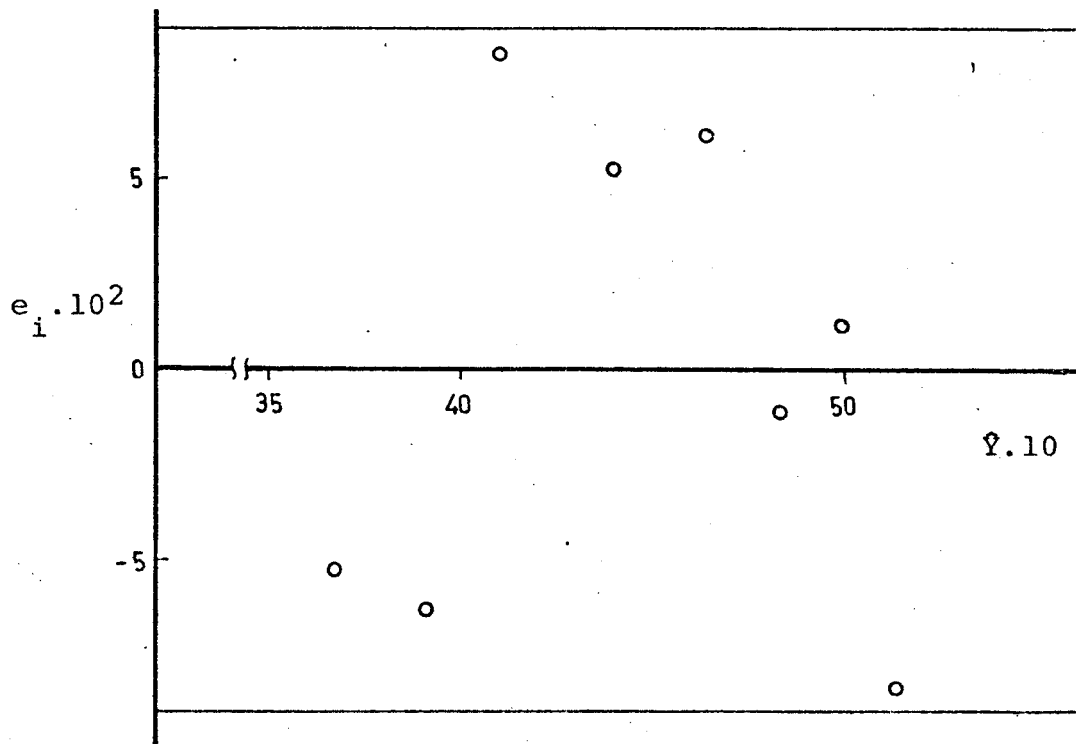


fig.4.8 - análise de resíduos : conjunto(j=2)

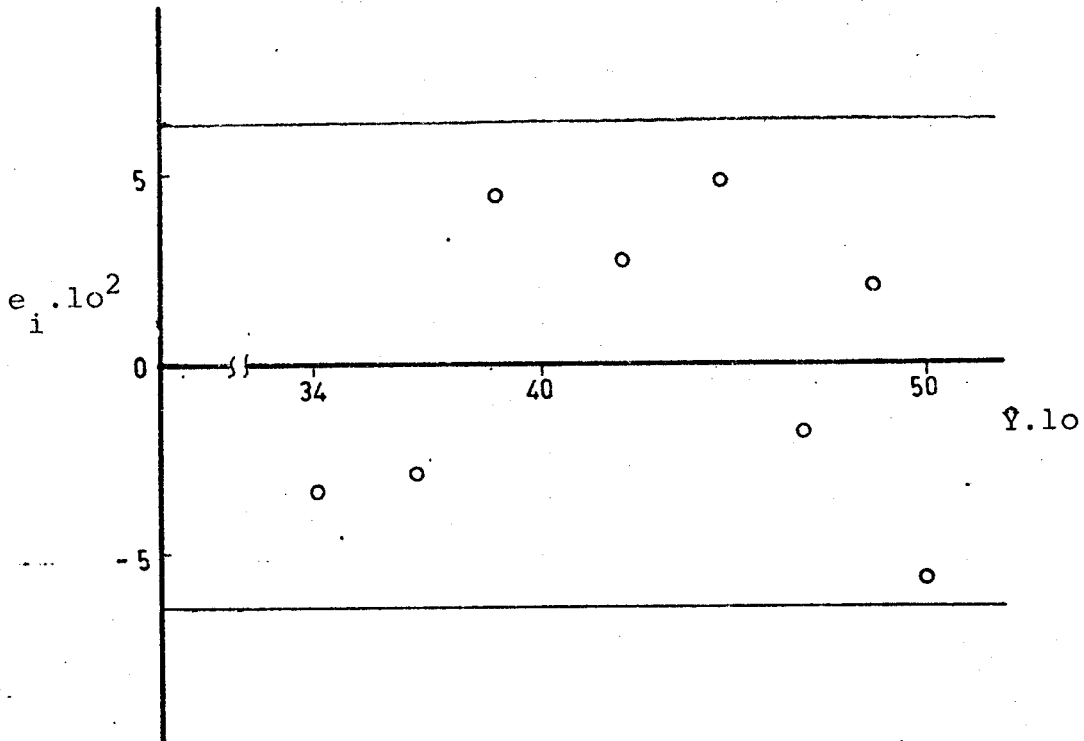


fig.4.9 - análise de resíduos : conjunto(j=3)

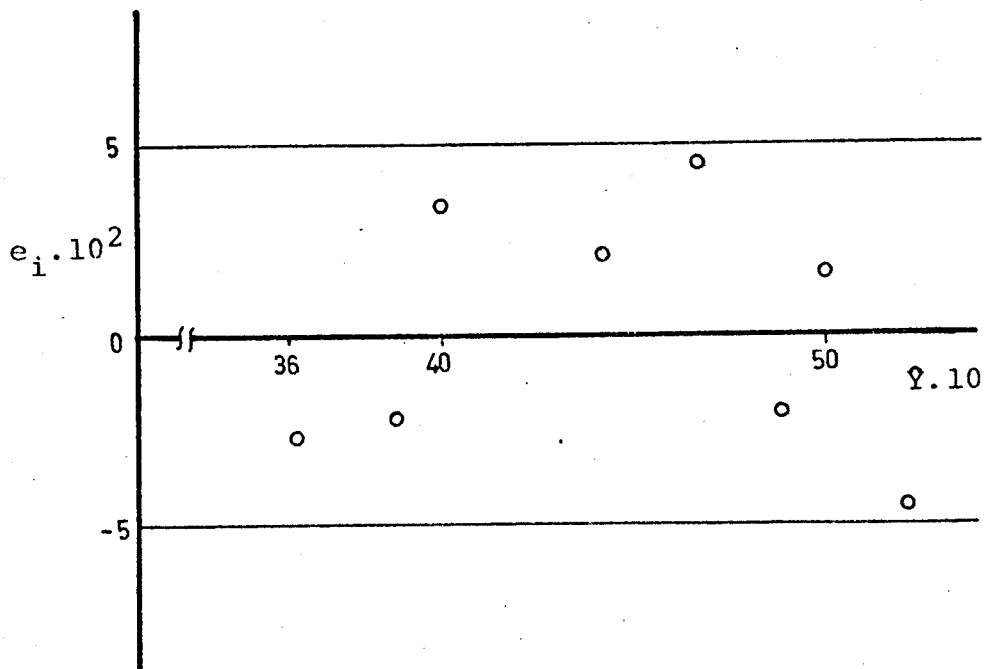


fig.4.10 - análise de resíduos : conjunto(j=4)

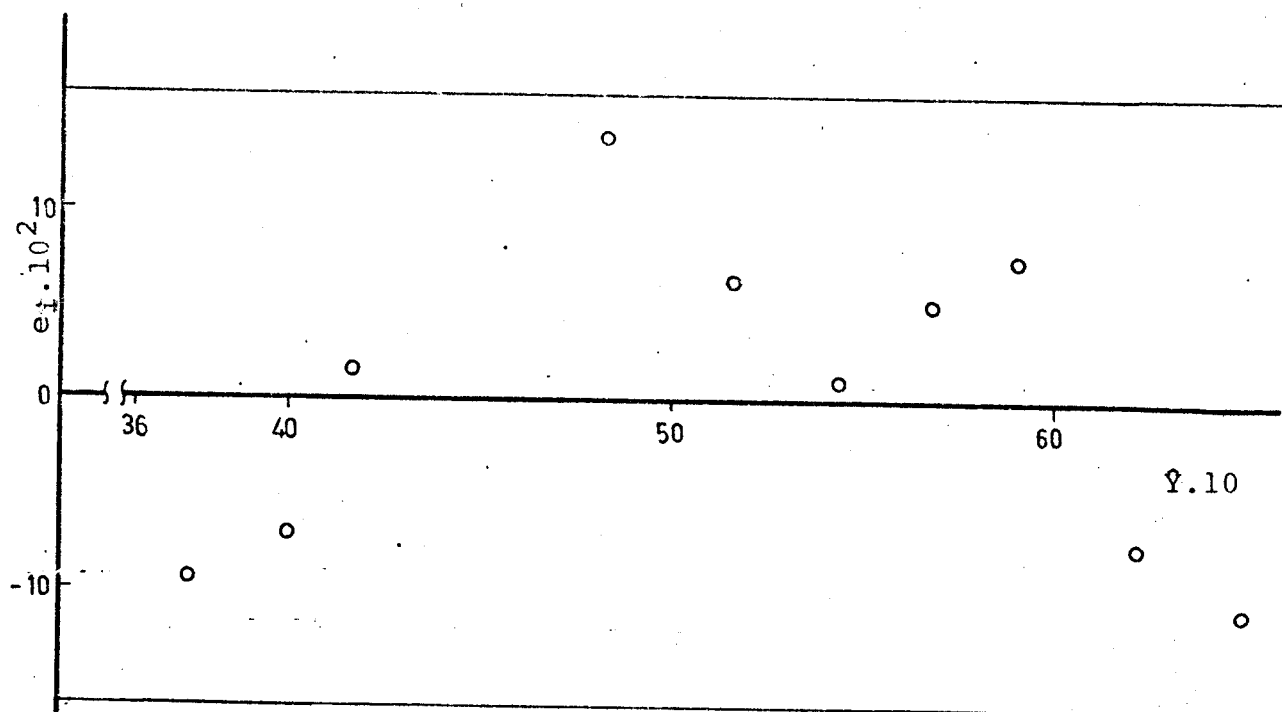


fig.4.11 - análise de resíduos : conjunto(j=5)

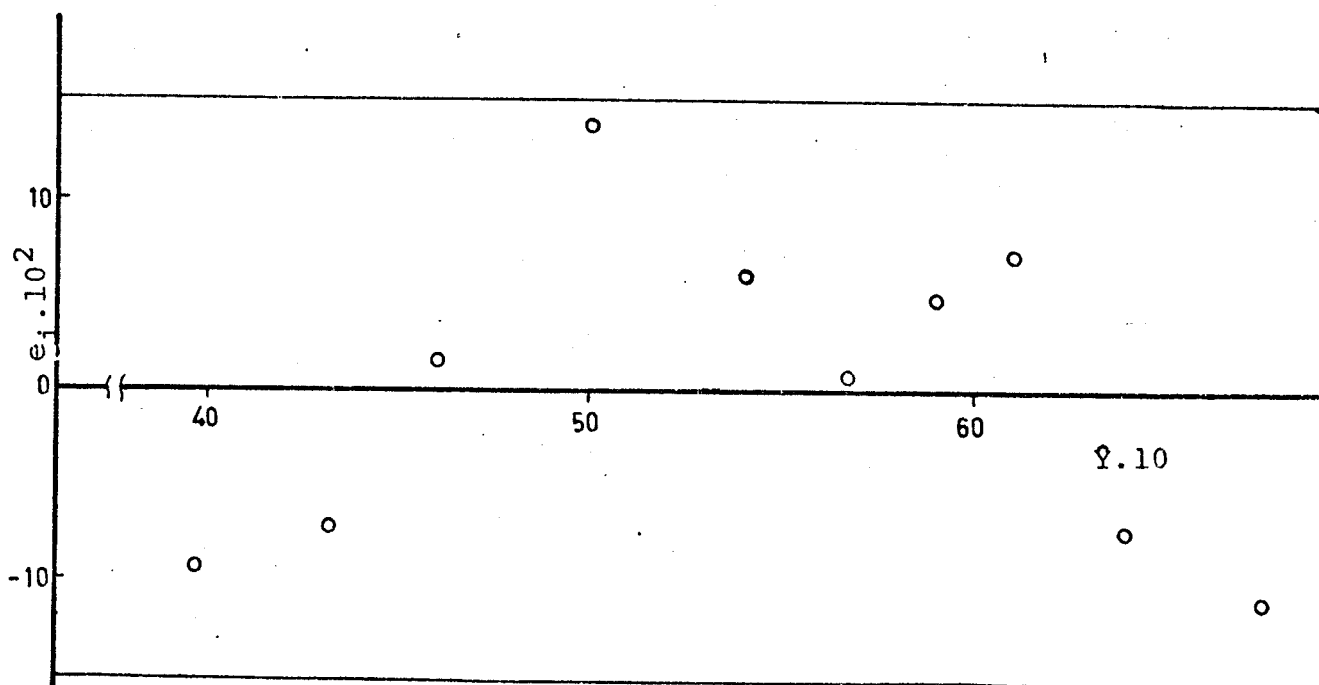


fig.12 - análise de resíduos : conjunto(j=6)

Tabela 4.8 - Valores de (\bar{Y}) obtidos para diferentes aproximações da estimativa b .

j estimativas	1	2	3	4	5	6
b	1,1228	1,0584	1,1577	1,1494	1,5471	1,5496
\bar{Y}	4,186791	4,464390	4,281091	4,482674	5,199629	5,429755
\bar{Y}	4,186791	4,464390	4,281091	4,482674	5,199629	5,429755
b	1,123	1,058	1,158	1,149	1,547	1,549
\bar{Y}	4,1869	4,4641	4,2813	4,4824	5,1995	5,4292
b	1,12	1,06	1,16	1,15	1,55	1,55
\bar{Y}	4,185	4,466	4,283	4,483	5,202	5,430

Tabela 4.9 - Estimações de Custo (C)* para o caso $j=3$, com diferentes aproximações da estimativa \underline{b}

\varnothing (pol)	(4.10)	(4.15)	(4.16)
1	30,46	30,46	30,46
1.1/4	39,44	39,44	39,46
1.1/2	48,71	48,71	48,75
2	67,96	67,97	68,07
2.1/2	88,00	88,01	88,17
3	108,67	108,70	108,94
3.1/2	129,90	129,95	130,27
4	151,61	151,68	152,10

*estamos usando estas aproximações apenas para facilitar a comparação.

$$\hat{C} = 30,46 D^{1,158} \quad (4.15)$$

$$\hat{C} = 30,46 D^{1,16} \quad (4.16)$$

Usando as equações acima, encontramos as estimativas de \underline{C} indicadas na tabela 4.9.

A tabela 4.9 indica que os desvios entre os valores calculados por (4.10) e (4.16) não ultrapassam (0,50), enquanto que os desvios observados são bem maiores, ou seja cêrca de (8,50). O uso da equação (4.16) parece mais indicado. Podemos estender o conceito para os outros conjuntos de dados. Obtemos as equações indicadas na tabela 4.10.

Tabela 4.10 - Equações para estimação de custo

conjunto j	Equação	nº
1	$\hat{C} = 28,45 D^{1,12}$	4.17
2	$\hat{C} = 39,40 D^{1,06}$	4.18
3	$\hat{C} = 30,46 D^{1,16}$	4.16
4	$\hat{C} = 37,49 D^{1,15}$	4.19
5	$\hat{C} = 42,47 D^{1,55}$	4.20
6	$\hat{C} = 53,34 D^{1,55}$	4.21

Analisemos agora a influência da variável tempo sobre o modelo ajustado.

No capítulo 3, mencionamos dois comportamentos distintos para a influência do tempo:

tipo 1 : os reajustes dos custos não variam com os diâmetros de tubos de uma mesma classe,

tipo 2 : os reajustes dos custos variam com os diâmetros de tubos de uma mesma classe.

Consideremos o comportamento tipo 1. Foi demonstrado no capítulo 3 que a estimativa b não sofre nenhuma influência do tempo. Se observarmos dados de um determinado conjunto em diferentes períodos e procedermos ao ajuste do modelo (3.3a'), o resultado será uma família de retas paralelas. Tomemos os dois conjuntos de dados que apresentam este comportamento e suas equações para estimação de custo:

$$\hat{c}_{i,3} = 30,46 D_i^{1,16}, \quad (4.16)$$

$$\hat{c}_{i,4} = 37,49 D_i^{1,15}. \quad (4.19)$$

Se indicamos por k, os diferentes períodos observados e por A_j a constante em cada equação, podemos escrever (4.16) e (4.19) como:

$$\hat{c}_{i,3} = A_{3k} D_i^{1,16} \quad (4.16a')$$

$$\hat{c}_{i,4} = A_{4k} D_i^{1,15} \quad (4.19a'),$$

mas $\underline{A}_{j,k}$ corresponde à estimação de \underline{C} para o valor unitário de \underline{D} . Podemos por conveniência expressar $\underline{A}_{j,k}$ em termos do valor observado \underline{C} quando \underline{D} é igual a unidade. Com o auxílio da tabela 4.5 e de (4.16) e (4.19) temos que:

$$A_{3k} = 0,966 C_{1,3} \quad (4.16a''),$$

$$A_{4k} = 0,973 C_{1,4} \quad (4.19a''),$$

portanto:

$$\hat{C}_{i,3} = 0,966 C_{1,3} D_i^{1,16} \quad (4.16a),$$

$$\hat{C}_{i,4} = 0,973 C_{1,4} D_i^{1,15} \quad (4.19a)$$

Consideremos o comportamento tipo 2. Com auxílio da tabela 3.2 podemos calcular \underline{C} para os diferentes períodos.

Tomemos o caso $\underline{j} = 5$. Aplicando o método dos mínimos quadrados para os \underline{t}_i , onde ($i = 0, 1, \dots, 9$), obtemos os resultados indicados na tabela 4.11.

Seja

$$b = \alpha_1 + \beta_1 t \quad (3.19), \text{ tes}$$

temos a hipótese $H_0 : \beta_1 = 0$

Tabela 4.11 - Estimativas obtidas para diferentes períodos ($j=5$)

t_i	a	b	\bar{Y}	R^2	r
0	3,191156	1,57	4,661266	0,9934	0,9967
1	3,206304	1,57	4,676508	0,9934	0,9967
2	3,330926	1,57	4,801056	0,9934	0,9967
3	3,352861	1,57	4,823010	0,9934	0,9967
4	3,375503	1,57	4,845740	0,9934	0,9967
5	3,494818	1,57	4,965018	0,9934	0,9967
6	3,552737	1,55	5,003423	0,9916	0,9958
7	3,705387	1,55	5,156002	0,9916	0,9958
8	3,739523	1,55	5,190183	0,9916	0,9958
9	3,748937	1,55	5,199629	0,9916	0,9958

Aplicando os mínimos quadrados aos pares (t_i, b_i) temos:

$$\hat{\alpha}_1 = 1,575091$$

$$\hat{\beta}_1 = -0,002909$$

$$F = \frac{\sum_{i=1}^k \hat{b}_i^2 - k \bar{b}^2}{\sum_{i=1}^k (b_i - \hat{b}_i)^2 / (k - 2)} = 21,38$$

com $F = 21,38$ ao nível de 95% de significância, rejeito a hipótese $H_0 : \beta_1 = 0$

Se H_0 é rejeitada e admitíssemos que (3.19) estimasse os valores de \underline{b} , teríamos que \underline{b} decresceria com o aumento de \underline{t} . Este não foi o comportamento observado. Encontramos dois valores constantes para a estimativa \underline{b} , a variação ocorreu quando a relação para reajuste de preço mudou. O comportamento observado para \underline{b} seria melhor explicado se:

$$\begin{cases} b = \hat{\alpha}_1 & \text{se } 0 < t \leq 5 \\ b = \hat{\alpha}_2 & \text{se } 5 < t \leq 9 \end{cases} \quad (4.22)$$

Analisemos para o caso $\underline{t} = 9$, as estimações (\hat{C}) obtidas quando: $b = \hat{\alpha}_1$, $b = \hat{\alpha}_2$ e $b = \bar{\alpha}$. Os resultados são mostrados na tabela 4.12.

Em qualquer uma das situações consideradas, observa-se que alguns desvios crescem enquanto que outros decrescem. O erro máximo é 16,7% quando $b = 1,57$ e 15,9% quando $b = 1,56$.

Tabela 4.12 - Estimações de custo (\hat{C})* para diferentes valores da estimativa \underline{b}

\bar{n} (pol)	$b = 1,57$	E' %	$b = 1,55$	E'	$b = 1,56$	E' %
1	42,47	9,0	42,47	9,0	42,47	9,0
1.1/4	60,29	6,6	60,02	7,0	60,15	6,8
1.1/2	80,27	2,8	79,62	1,9	79,94	2,3
2	126,10	16,7	124,36	15,1	125,22	15,9
2.1/2	179,00	8,6	175,75	6,6	177,37	7,6
3	238,32	3,8	223,14	2,8	235,72	2,6
3.1/2	303,58	8,3	296,07	5,6	299,80	6,9
4	374,38	11,5	364,15	8,5	369,23	10,0
5	531,45	4,0	514,62	7,0	522,97	5,5
6	707,59	7,0	682,68	10,3	695,02	8,7

*estamos usando estas aproximações apenas para facilitar a comparação

Consideremos o valor D_i , os erros não conduzem nunca a estimações de C_i maiores ou menores que o custo observado para D_{i+1} e D_{i-1} respectivamente.

Podemos, baseando-nos no conjunto de dados observados, concluir que a influência do tempo em (3.3) embora exista é pequena.

Consideraremos para a estimativa \underline{b} os valores correspondentes ao último período observado (fevereiro 79).

Indicando por \underline{i} os diferentes diâmetros, por \underline{j} as diferentes classes de tubos e por \underline{k} os diferentes períodos podemos escrever:

$$C_{i,j} = (A_{j,k}) (D_i)^{bj}$$

usando os desvios (E') indicados na tabela 4.5, temos:

$$\hat{C}_{i,1} = 0,955 C_{1,1} (D_i)^{1,12} \quad (4.17a)$$

$$\hat{C}_{i,2} = 0,949 C_{1,2} (D_i)^{1,06} \quad (4.18a)$$

$$\hat{C}_{i,5} = 0,910 C_{1,5} (D_i)^{1,55} \quad (4.20a)$$

$$C_{i,6} = 0,909 C_{1,6} (D_i)^{1,55} \quad (4.21a)$$

A estimação de \underline{C} pode ser melhorada se introduzimos um fator de correção (h).

Tabela 4.13 - Fatores de correção para a estimativa de custo

\varnothing_n \ j (pol)	1	2	3	4	5	6
1	1,047	1,054	1,035	1,028	1,099	1,100
1.1/4	1,045	1,065	1,028	1,023	1,076	1,076
1.1/2	0,941	0,920	0,958	0,966	0,981	0,981
2	0,957	0,947	0,971	0,978	0,869	0,869
2.1/2	0,953	0,939	0,951	0,957	0,938	0,938
3	1,017	1,009	1,016	1,020	1,029	0,990
3.1/2	0,985	0,985	0,977	0,982	0,947	0,951
4	1,080	1,086	1,055	1,045	0,922	0,926
5	-	-	-	-	1,076	1,079
6	-	-	-	-	1,115	1,118

Lembrando (4.14) temos:

$$c = \frac{\hat{c}}{1+E'} \quad \text{ou} \quad c = \frac{\hat{c}}{1-E'} \quad (4.23)$$

seja

$$\begin{cases} h = \frac{1}{1+E'} \\ -h = \frac{1}{1-E'} \end{cases} \quad (4.24), \quad a$$

tabela 4.13 mostra os valores de h e $-h$.

As equações (4.16a) a (4.21a) e a tabela 4.13 permitem a estimação de custo do tubo para qualquer diâmetro (D), requerendo apenas o conhecimento do custo para D igual à unidade.

Consideremos que as equações de custo serão utilizadas para a determinação de soluções econômicas ótimas. Neste caso necessitaremos de equações expressas em termos do diâmetro interno, pois o custo variável será uma função desta variável.

Aplicando mínimos quadrados ao mesmo conjunto de dados mas, usando os X_j gerados para os valores de D' indicados na tabela 3.5, obtemos os resultados mostrados na tabela 4.14. Podemos escrever as equações:

$$\hat{c}_{1,1} = 0,837 c_{1,1} (D'_i)^{1,17} \quad (4.25)$$

$$\hat{c}_{1,2} = 0,838 c_{1,2} (D'_i)^{1,11} \quad (4.26)$$

$$\hat{c}_{1,3} = 0,854 c_{1,3} (D'_i)^{1,21} \quad (4.27)$$

Tabela 4.14 - Estimativas obtidas para as retas de regressão usando o diâmetro interno (D)

estimativas	j					
	1	2	3	4	5	6
a	3,216043	3,549308	3,292723	3,501364	3,637566	3,865140
b	1,17	1,11	1,21	1,20	1,61	1,62
$\hat{\sigma}_r^2$	0,003999	0,005411	0,003032	0,002416	0,008113	0,006761
$\hat{\sigma}_r$	0,063243	0,073560	0,055061	0,049154	0,090070	0,082225
Y	4,186791	4,464391	4,281091	4,482674	5,199629	5,429755
CV	0,015105	0,016477	0,001286	0,010965	0,017322	0,015143
R ²	0,9892	0,9839	0,9924	0,9938	0,9930	0,9930
r	0,9946	0,9919	0,9962	0,9969	0,9965	0,9965

$$\hat{c}_{i,4} = 0,860 c_{1,4} (D'_i)^{1,20} \quad (4.28)$$

$$\hat{c}_{i,5} = 0,814 c_{1,5} (D'_i)^{1,61} \quad (4.29)$$

$$\hat{c}_{i,6} = 0,813 c_{1,6} (D'_i)^{1,62} \quad (4.30)$$

Consideremos agora a tabela 3.3, e apliquemos mínimos quadrados ao conjunto $j = 13$. Os resultados estão indicados na tabela 4.15, e mostrados na figura 4.13.

Tabela 4.15 - Estimativas de mínimos quadrados para o caso $j=13$

estimativas	$D \geq 1/8$	$D \geq 1$
a	7,252695	7,099001
b	0,78	1,12
R^2	0,9388	0,9944
r	0,9689	0,9972

Os resultados para ($D \geq 1$) são melhores que os resultados para ($D \geq 1/8$). Consideraremos então apenas os pares (X_i, Y_i) gerados para ($D \geq 1$), os resultados obtidos para os outros conjuntos são mostrados na tabela 4.16. e figura 4.14. Podemos escrever as seguintes equações:

$$\hat{c}_{i,7} = 0,981 c_{1,7} (D'_i)^{1,03} \quad (4.31)$$

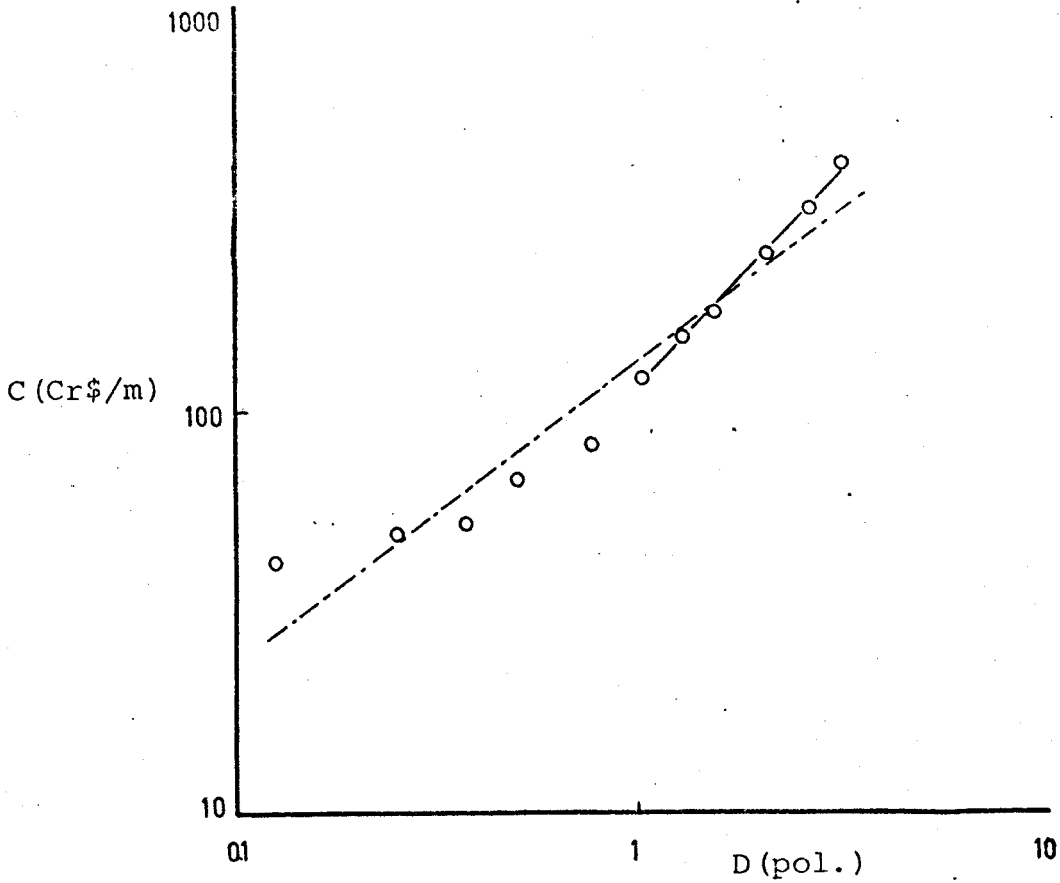


fig.4.13 - reta estimada : conjunto(j=13)

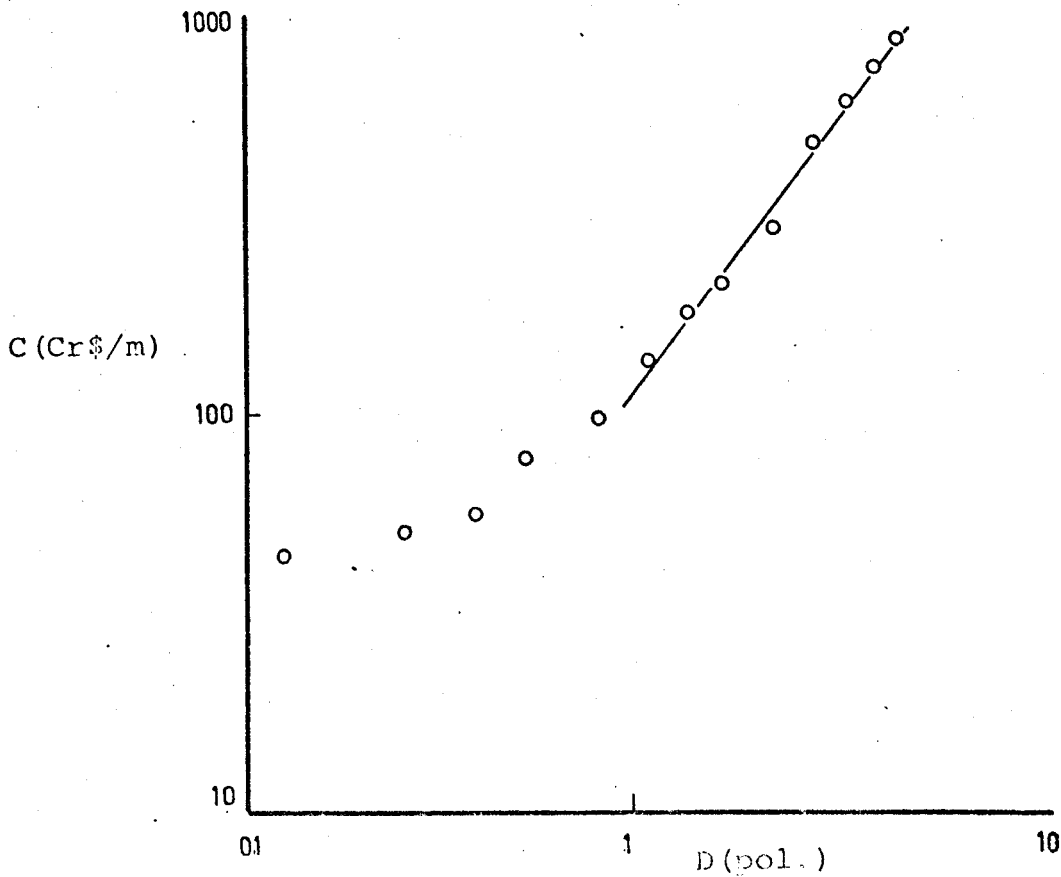


fig.4.14 - reta estimada : conjunto(j=9)

$$\hat{c}_{i,8} = 0,981 c_{i,8} (D_i)^{1,03} \quad (4.32)$$

$$\hat{c}_{i,9} = 0,945 c_{i,9} (D_i)^{1,37} \quad (4.33)$$

$$\hat{c}_{i,10} = 0,945 c_{i,10} (D_i)^{1,37} \quad (4.34)$$

$$\hat{c}_{i,11} = 0,951 c_{i,11} (D_i)^{1,42} \quad (4.35)$$

$$\hat{c}_{i,12} = 0,951 c_{i,12} (D_i)^{1,42} \quad (4.36)$$

$$\hat{c}_{i,13} = 0,971 c_{i,13} (D_i)^{1,12} \quad (4.37)$$

$$\hat{c}_{i,14} = 0,971 c_{i,14} (D_i)^{1,12} \quad (4.38)$$

Tabela 4.16 - Estimativas de mínimos quadrados para tubos de aço inoxidável.

estimativa j	a	b	R ²	r
7*	7,049935	1,03	0,9962	0,9981
8*	7,328143	1,03	0,9962	0,9981
9*	7,447167	1,37	0,9922	0,9961
10*	7,168966	1,37	0,9922	0,9961
11*	7,418911	1,42	0,9938	0,9969
12*	7,697108	1,42	0,9938	0,9969
13	7,099001	1,12	0,9944	0,9972
14	7,372849	1,12	0,9944	0,9972
(*) 4 ≥ D ≥ 1				

Embora as quantidades R^2 e r indiquem que o uso das equações (4.31) a (4.38) resulta em boa estimativa para C , este deve ser cuidadoso pois desconhecemos as possíveis influências das oscilações de custo nas equações (processo inflacionário).

4.2 - Equações para custo anual fixo

Na secção anterior determinamos expressões para o custo do tubo. O custo fixo da tubulação inclui também o custo de acessórios, geralmente expresso em termos do custo do tubo através de um fator. E este pode ser aplicado quando o custo dos acessórios varia com o diâmetro da mesma forma que o custo do tubo. Como não dispomos desta informação preferimos desconsiderar este item.

O custo anual fixo é composto de dois termos: a depreciação e a manutenção, que são expressos como uma fração do investimento.

A legislação brasileira estabelece que a depreciação (d) de máquinas e equipamentos é de dez por cento ao ano (10% aa) [15].

Consideraremos para a manutenção (m) a taxa de cinco por cento ao ano (5% aa), um valor geralmente utilizado [18].

Podemos escrever o custo anual fixo como:

$$C_f = (d + m) A_j (D)^b \quad (4.39), \text{ em}$$

tão, usando os valores de d e m e substituindo nas equações (4.25) a (4.30), temos:

$$C_{f,1} = 0,126 C_{1,1} (D)^{1,17} \quad (4.40)$$

$$c_{f,2} = 0,126 c_{1,2}(D)^{1,11} \quad (4.41)$$

$$c_{f,3} = 0,128 c_{1,3}(D)^{1,21} \quad (4.42)$$

$$c_{f,4} = 0,129 c_{1,4}(D)^{1,20} \quad (4.43)$$

$$c_{f,5} = 0,122 c_{1,5}(D)^{1,61} \quad (4.44)$$

$$c_{f,6} = 0,122 c_{1,6}(D)^{1,62} \quad (4.45)$$

4.3 - Custo anual total e equação para otimização econômica

4.3.1 - Escoamento laminar

Consideremos a equação (3.23) Expressando \underline{D} em polegadas temos:

$$C_v = \frac{(7,55 \times 10^{-3}) (C_2/E) (H) (\mu) (Q^2)}{D^4} \quad (4.46)$$

utilizando (4.39) podemos escrever:

$$C_{tt} = \frac{(7,55 \times 10^{-3}) (C_2/E) (H) (\mu) (Q^2)}{D^4} + (d+m)A_j(D)^b \quad (4.47)$$

derivando em relação a \underline{D} e igualando a zero, temos:

$$\frac{d(C_{tt})}{d(D)} = \frac{(-4)(7,55 \times 10^{-3}) (C_2/E) (H) (\mu) (Q^2)}{D^5} + b(d+m)A_j(D)^{b-1} = 0$$

então, (4.48)

$$D_o = \left[\frac{(0,0302) (C_2/E) (H) (\mu) (Q^2)}{b(d+m)A_j} \right]^{1/(4+b)} \quad (4.49)$$

seja

$$K = \frac{(0,0302) (C_2/E) (H)}{b(d+m)A_j}$$

$$D_o = [(K)(\mu)(Q^2)]^{\frac{1}{4+b}} \quad (4.50).$$

Considerando as equações (4.40) a (4.45) obtemos:

$$D_{o,1} = (K_1^{0,193})(\mu^{0,193})(Q^{0,387}) \quad (4.51),$$

$$K_1 = 0,205 \frac{(C_2/E)(H)}{C_{1,1}},$$

$$D_{o,2} = (K_2^{0,196})(\mu^{0,196})(Q^{0,391}) \quad (4.52),$$

$$K_2 = 0,216 \frac{(C_2/E)(H)}{C_{1,2}};$$

$$D_{o,3} = (K_3^{0,192})(\mu^{0,192})(Q^{0,384}) \quad (4.53),$$

$$K_3 = 0,195 \frac{(C_2/E)(H)}{C_{1,3}};$$

$$D_{o,4} = (K_4^{0,192})(\mu^{0,192})(Q^{0,385}) \quad (4.54),$$

$$K_4 = 0,195 \frac{(C_2/E)(H)}{C_{1,4}};$$

$$D_{o,5} = (K_5^{0,178}) (\mu^{0,178}) (Q^{0,357}) \quad (4.55),$$

$$K_5 = 0,154 \frac{(C_2/E)(H)}{C_{1,5}} ;$$

$$D_{o,6} = (K_6^{0,178}) (\mu^{0,178}) (Q^{0,356}) \quad (4.56),$$

$$K_6 = 0,153 \frac{(C_2/E)(H)}{C_{1,6}} .$$

As figuras 4.15 e 4.16 mostram a resolução gráfica de (4.51) e (4.56).

4.3.2 - Escoamento turbulento

4.3.2.1 - Soluções obtidas para um f aproximado

Expressando D em polegadas, da equação (3.24) obtemos:

$$C_v = \frac{(5,21 \times 10^{-7}) (C_2/E)(H) (\mu^{0,16}) (\rho^{0,84}) (Q^{2,84})}{D^{4,84}} ,$$

(4.58)

utilizando (4.39) podemos escrever:

$$C_{tt} = \frac{(5,21 \times 10^{-7}) (C_2/E) (H) (\mu^{0,16}) (\rho^{0,84}) (Q^{2,84})}{D^{4,84}} + (d+m) A_j (D)^b \quad (4.59),$$

derivando em relação a \underline{D} e igualando a zero temos:

$$\frac{d(C_{tt})}{d(D)} = \frac{(-4,84) (5,21 \times 10^{-7}) (C_2/E) (H) (\mu^{0,16}) (\rho^{0,84}) (Q^{2,84})}{D^{5,84}} + b(d+m) A_j (D)^{b-1} = 0 \quad (4.60).$$

Então:

$$D_0 = \left[\frac{(2,52 \times 10^{-6}) (C_2/E) (H) (\mu^{0,16}) (\rho^{0,84}) (Q^{2,84})}{b(d+m) A_j} \right]^{\frac{1}{b+4,84}} \quad (4.61).$$

$$\text{Seja } K' = \frac{(2,52 \times 10^{-6}) (C_2/E) (H)}{b(d+m) A_j},$$

$$D_0 = \left[(K') (\mu^{0,16}) (\rho^{0,84}) (Q^{2,84}) \right]^{\frac{1}{b+4,84}} \quad (4.62).$$

Considerando as equações (4.40) a (4.45) obtemos:

$$D_{o,1} = (K'_1)^{0,166} (\mu)^{0,027} (\rho)^{0,139} (Q)^{0,471} \quad (4.63)$$

$$K'_1 = \frac{(1,71 \times 10^5) (C_2/E) (H)}{C_{1,1}}$$

$$D_{o,2} = (K'_2)^{0,168} (\mu)^{0,027} (\rho)^{0,141} (Q)^{0,477} \quad (4.64)$$

$$K'_2 = \frac{(1,80 \times 10^5) (C_2/E) (H)}{C_{1,2}}$$

$$D_{o,3} = (K'_3)^{0,165} (\mu)^{0,026} (\rho)^{0,139} (Q)^{0,469} \quad (4.65)$$

$$K'_3 = \frac{(1,63 \times 10^5) (C_2/E) (H)}{C_{1,3}}$$

$$D_{o,4} = (K'_4)^{0,166} (\mu)^{0,026} (\rho)^{0,139} (Q)^{0,471} \quad (4.66)$$

$$K'_4 = \frac{(1,63 \times 10^5) (C_2/E) (H)}{C_{1,4}}$$

$$D_{o,5} = (K'_5)^{0,155} (\mu)^{0,025} (\rho)^{0,130} (Q)^{0,440} , \quad (4.67)$$

$$K'_5 = \frac{(1,28 \times 10^{-5}) (C_2/E) (H)}{C_{1,5}}$$

$$D_{o,6} = (K'_6)^{0,155} (\mu)^{0,025} (\rho)^{0,130} (Q)^{0,440} \quad (4.68)$$

$$K'_6 = \frac{(1,27 \times 10^{-5}) (C_2/E) (H)}{C_{1,6}}$$

As figuras 4.17 e 4.18 mostram a resolução das equações (4.63) e (4.68).

4.3.2.2 - Soluções obtidas usando a equação de Colebrook

Os resultados para o fator de fricção foram obtidos considerando-se escoamento de água em tubos de aço comercial.

O custo variável foi calculado para valores estimados de C_2 , E e H . O custo fixo foi estimado para $C_{i,1}$ referentes a fevereiro de 1979.

Os resultados podem ser vistos no apêndice .

As figuras 4.19 e 4.20 mostram o gráfico custo anual total vs diâmetro, para diferentes taxa de fluxo.

4.4 - Critério para determinação do regime de escoamento

Consideremos (3.28). Expressando D em polegadas te mos:

$$D = (6,63 \times 10^{-6}) \frac{Q \rho}{\mu} \quad (4.69)$$

Resolvendo (4.69) e (4.50) obtêm-se o fluxo crítico (Q_c):

$$Q_c = \left[(1,51 \times 10^5) K \left(\frac{1}{4+b} \right)^{\frac{3+b}{4+b}} \frac{4+b}{2+b} \mu / \rho \right] \quad (4.70)$$

Seja $K'' = (1,51 \times 10^5) K \frac{1}{4+b}$

$$Q_c = \left[(K'') (\mu)^{\frac{3+b}{4+b}} / \rho \right]^{\frac{4+b}{2+b}} \quad (4.71)$$

Substituindo, de acordo com as equações (4.51) a (4.56), temos:

$$Q_{c1} = (K''_1)^{1,631} (\mu)^{1,315} / (\rho)^{1,631}, \quad (4.72)$$

$$Q_{c2} = (K''_2)^{1,643} (\mu)^{1,322} / (\rho)^{1,643}, \quad (4.73)$$

$$Q_{c3} = (K_3'')^{1,623} (\mu)^{1,312} / (\rho)^{1,623} , \quad (4.74)$$

$$Q_{c4} = (K_4'')^{1,625} (\mu)^{1,313} / (\rho)^{1,625} , \quad (4.75)$$

$$Q_{c5} = (K_5'')^{1,554} (\mu)^{1,277} / (\rho)^{1,554} , \quad (4.76)$$

$$Q_{c6} = (K_6'')^{1,552} (\mu)^{1,276} / (\rho)^{1,552} . \quad (4.77)$$

As figuras 4.21 e 4.22 mostram a resolução das equações (4.72) e (4.77).

4.5 - Relação econômica ótima entre custo fixo e variável

Consideremos as equações (4.39), (4.46) e (4.58). Podemos escrever:

$$C_f = G D^x , \quad (4.78)$$

$$C_v = B D^{-y} , \quad (4.79)$$

$C_{tt} = GD^x + BD^{-y}$. Desejamos otimizar D, en-

tão:

$$\frac{d(C_{tt})}{d(D)} = xGD_o^{x-1} - yBD_o^{-y+1} = 0$$

$$\frac{x}{y} = \frac{BD_o^{-y}}{GD_o^x} = \frac{C_v}{C_f} \quad (4.80)$$

Aplicando (4.81) ao nosso caso temos:

- escoamento laminar

$$\frac{C_v}{C_f} = \frac{b}{4} \quad (4.81)$$

- escoamento turbulento ($f = 0,16 Re^{-0,16}$)

$$\frac{C_v}{C_f} = \frac{b}{4,84} \quad (4.82),$$

os resultados estão indicados na tabela 4.17.

Quando o fator de fricção foi determinado utilizando a equação de Colebrook, obtivemos as relações entre custo fixo e variável indicadas na tabela 4.18.

Tabela 4.17 - Relação econômica ótima entre custos (C_v/C_f)

J	escoamento		turbulento ($f = 0,16 R_e^{-0,16}$)
	laminar		
1 a 4	0,30		0,25
5 a 6	0,40		0,33

Tabela 4.18 - Relação econômica ótima entre custos (C_v/C_f) para escoamento turbulento (usando Colebrook)

Q	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
j=1	0,20	0,29	0,35	0,33	-	-	-	-	-	-
j=3	0,19	0,27	0,32	0,30	-	-	-	-	-	-
j=5	0,55	0,24	0,10	0,42	0,31	0,23	0,35	0,51	0,16	0,22

4.6 - Escoamento turbulento - comparação entre os diâmetros econômicos

Vamos determinar os diâmetros econômicos, para escoamento de água, usando as equações (4.65) e (4.67) com as mesmas variáveis econômicas empregadas na secção 4.3.2.2. Os resultados estão indicados na tabela 4.19.

Tabela 4.19 - *Diâmetros econômicos (Dn Pol.) para escoamento de água (**)*

Q	Eq. (4.65)		Item	Eq. (4.67)		Item
	Resposta	Dn (a ser usado)	4.3.2.2	Resposta	Dn (a ser usado)	4.3.2.2
5	2,07	2	2	1,77	1.1/2 ou 2*	1.1/2
10	2,86	2.1/2 ou 3*	2.1/2	2,40	2.1/2	2.1/2
15	3,46	3 ou 3.1/2*	3	2,87	3	3
20	3,96	3.1/2 ou 4*	3.1/2	3,26	3 ou 3.1/2*	3
25	-	-	-	3,60	3.1/2	3.1/2
30	-	-	-	3,90	4	4
35	-	-	-	4,17	4	4
40	-	-	-	4,42	4	4
45	-	-	-	4,66	5	5
50	-	-	-	4,88	5	5

(**) com as variáveis econômicas indicadas na apendice.

(*) A diferença no custo anual total é de cerca de dois cruzeiros por metro de comprimento do tubo.

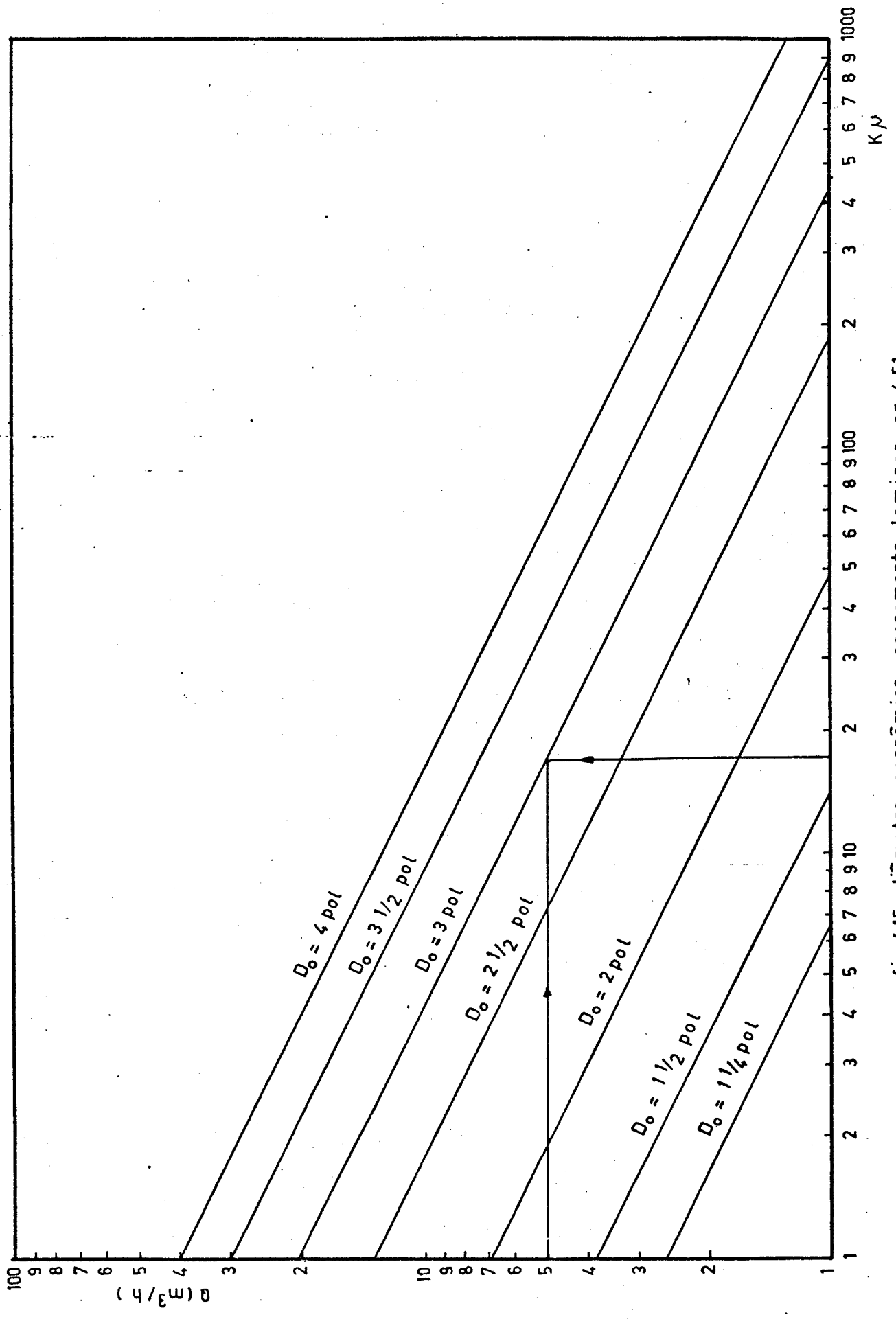


fig.4.15- diâmetro econômico - escoamento laminar - eq.4.51

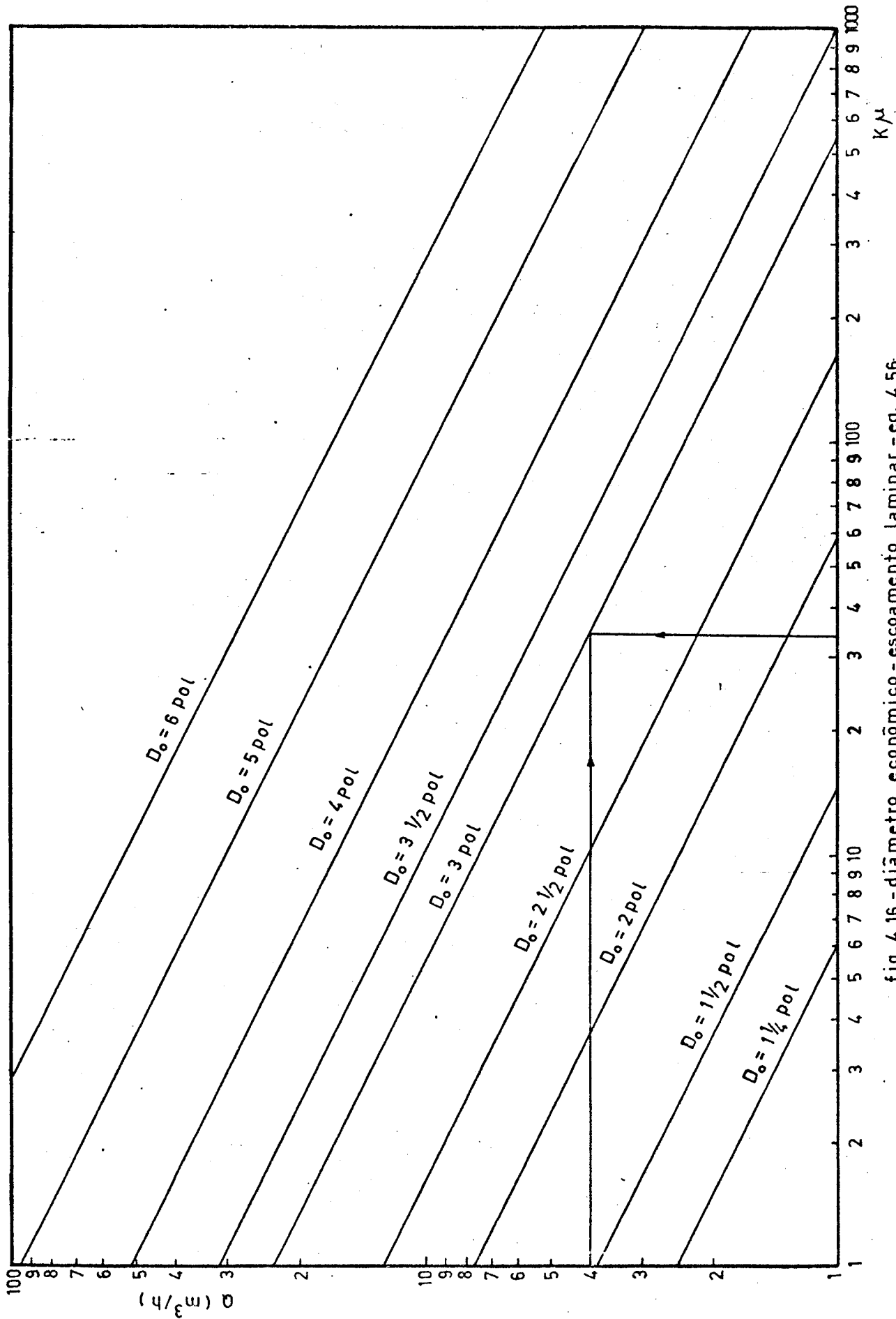


fig. 4.16 - diâmetro econômico - escoamento laminar - eq. 4.56

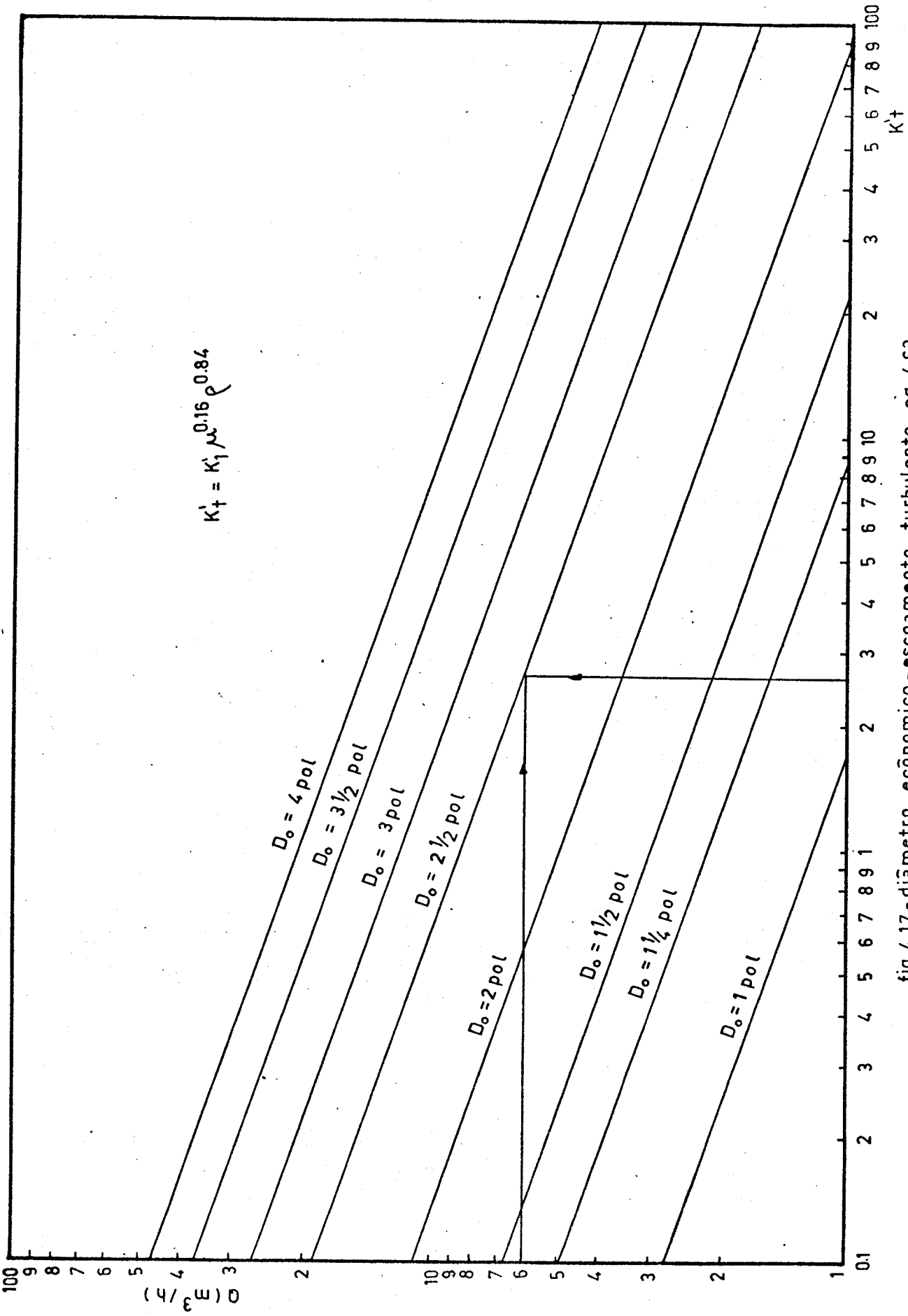


fig 4.17 - diâmetro econômico - escoamento turbulento - eq. 4.63

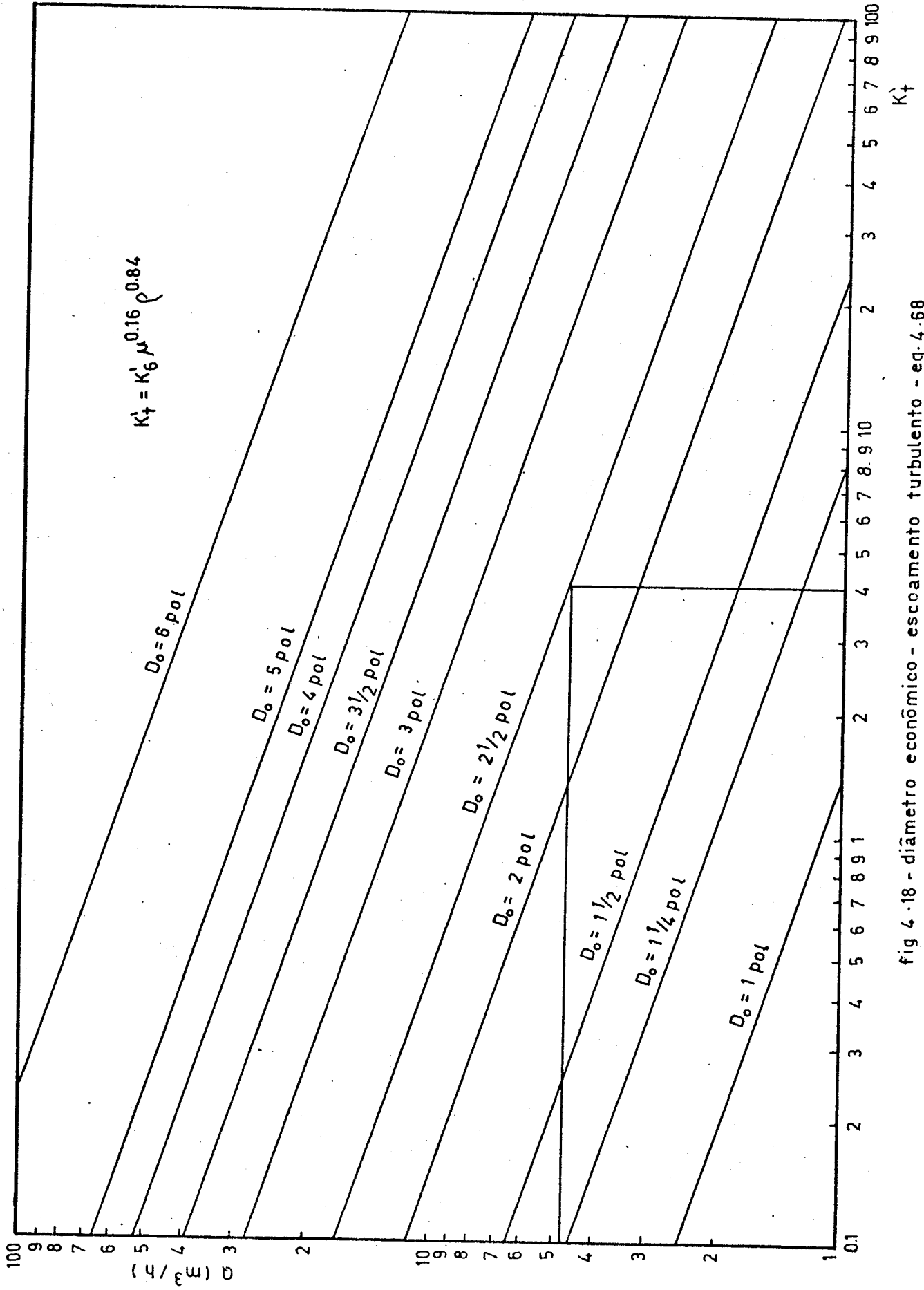


fig 4 -18 - diâmetro econômico - escoamento turbulento - eq. 4.68

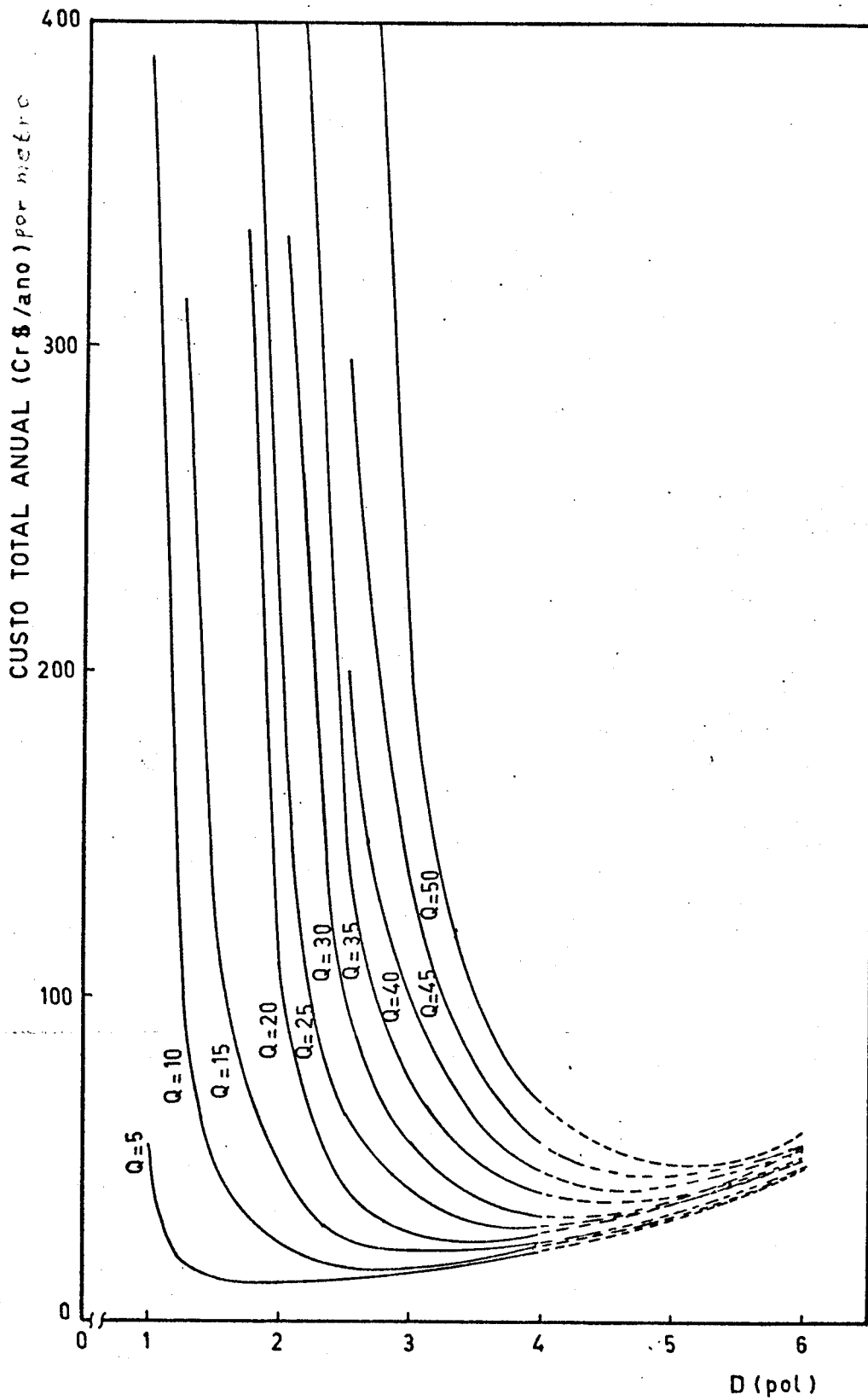


fig 4.19 - diâmetro econômico-escoamento de água (usando Colebrook). $j=3$

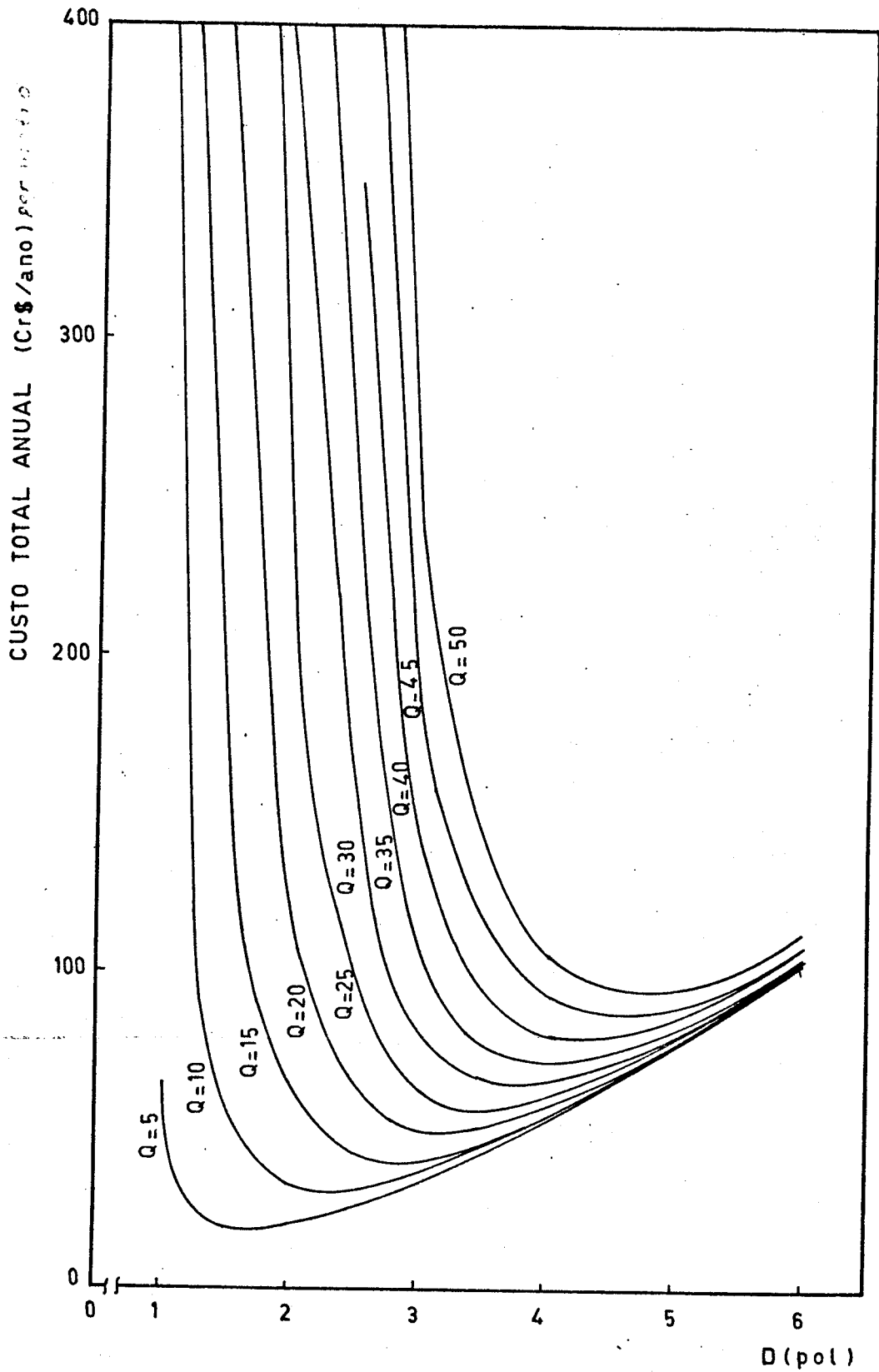


fig 4.20- diâmetro econômico- escoamento de água (usando Colebrook). $j=5$

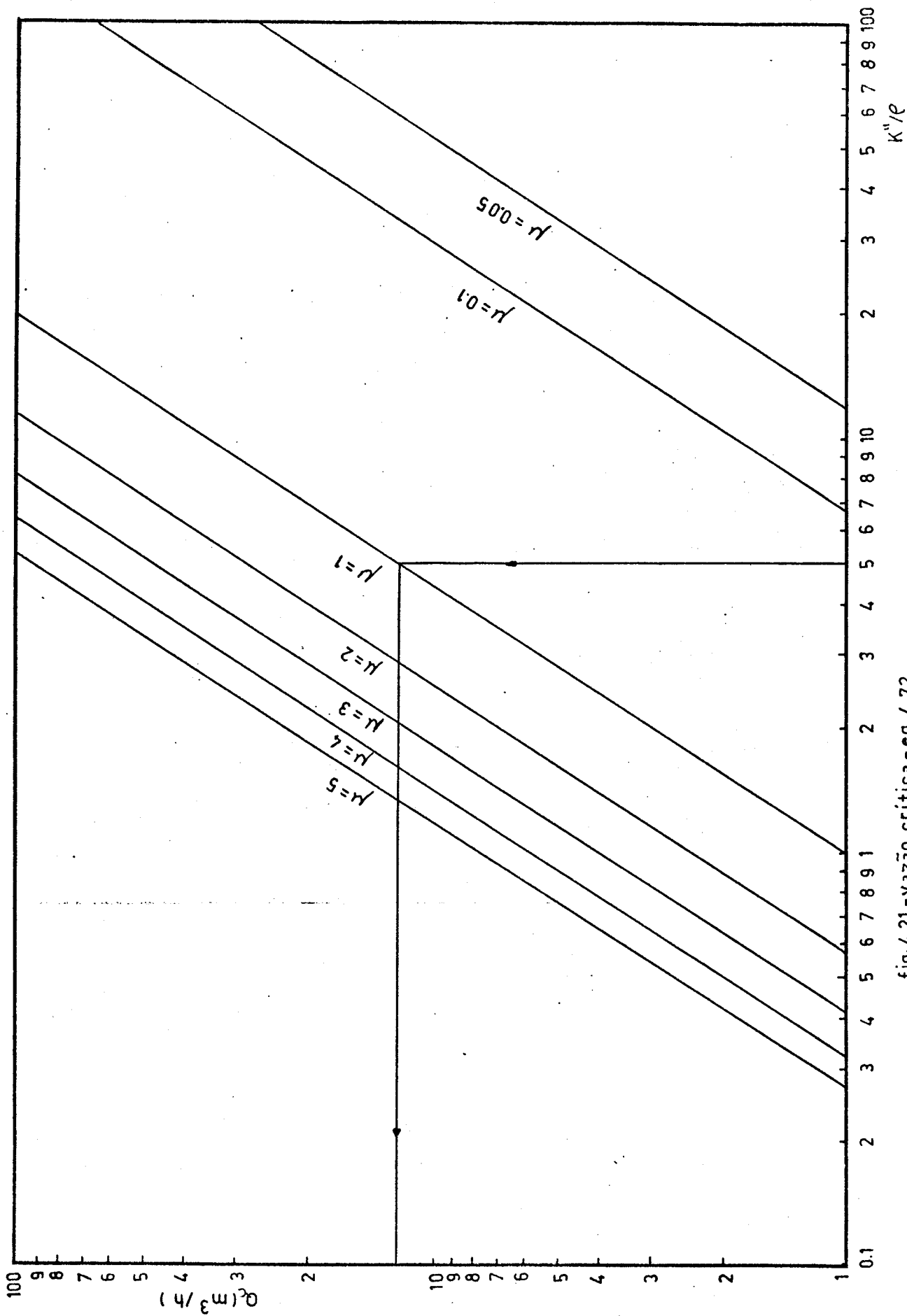


fig. 4.21 - vazão crítica - eq. 4.72

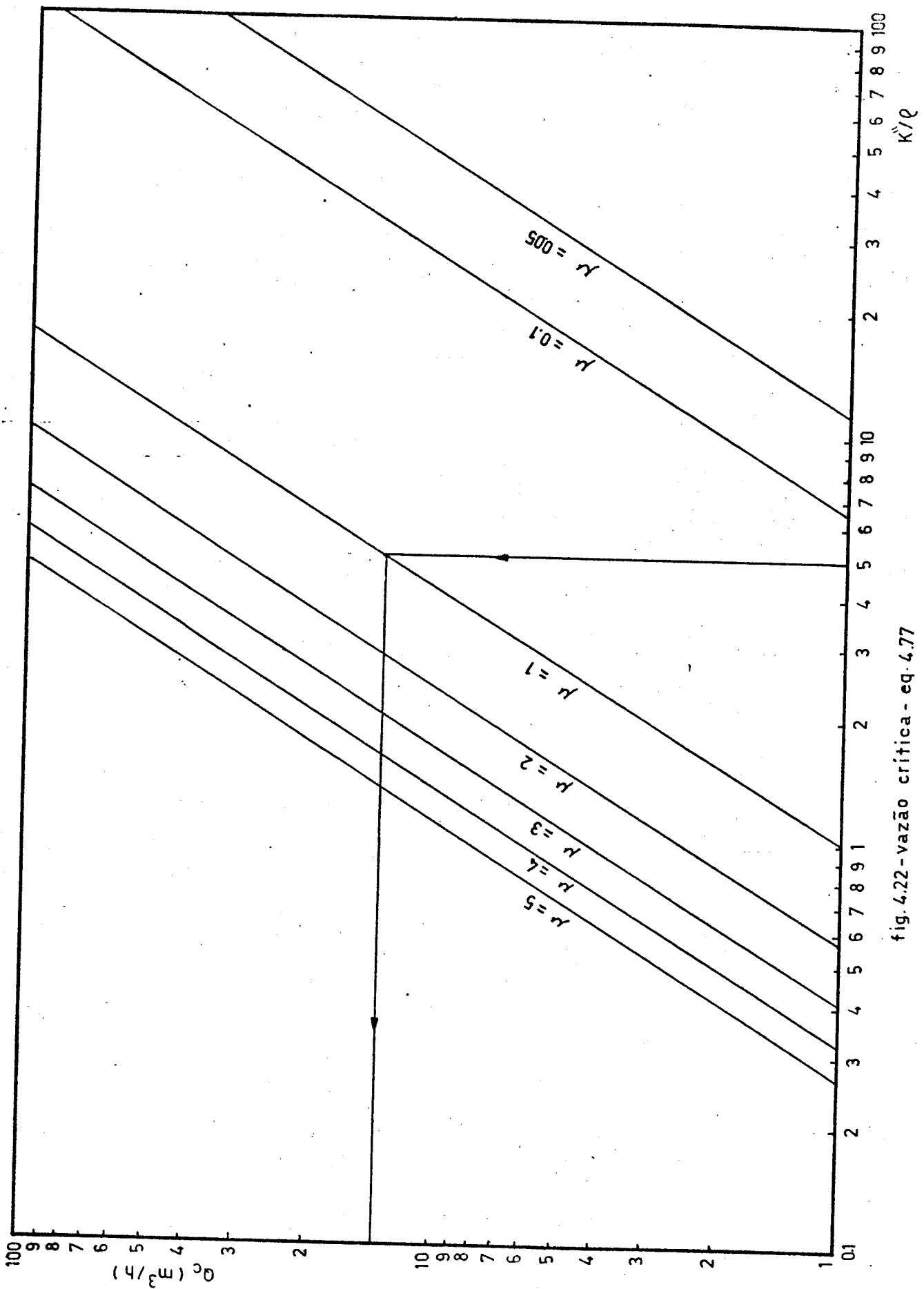


fig. 4.22 - vazão crítica - eq. 4.77

NOMENCLATURA^a

- C : custo do tubo, Cr\$/m.
 C_1 : custo do tubo de 1 polegada de diâmetro, Cr\$/m.
 C_f : custo anual fixo, Cr\$/ano (por metro de tubo).
 C_v : custo anual variável, Cr\$/ano (por metro de tubo).
 C_{tt} : custo anual total, Cr\$/ano (por metro de tubo).
 D : diâmetro nominal, polegadas.
 D' : diâmetro interno, polegadas.
 D_n : diâmetro nominal, polegadas.
 D_o : diâmetro econômico, polegadas.
 E : eficiência global da bomba e motor, adimensional.
 f : fator de fricção, adimensional.
 H : horas de operação por ano.
 Q : taxa de fluxo, m^3/h .
 q : taxa de fluxo, m^3/s .
 Q_c : taxa de escoamento crítica, m^3/h .
 v : velocidade, m/s.
 ρ : densidade, kg/m^3 .
 μ : viscosidade, $kg/m.s..$
 ΔP_a : perda de carga, N/m^2 .
 $(\hat{\quad})$: valor estimado
 $(-)$: valor médio.
 \varnothing : diâmetro.

^a somente a não definida no texto.

C A P I T U L O - 5

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1 - O modelo ajustado para a equação de custo fixo

A escolha do modelo para a equação de custo fixo a ser testado baseou-se em dois aspectos:

- 1) O modelo de variação do custo como uma função potencia do diâmetro foi adotado por diversos autores, o que conduziu ao estudo de sua aplicação às condições brasileiras. Por outro lado, quando as oscilações de custo podem ser expressas como uma variação percentual em relação a um certo valor base, o parâmetro β mantém-se invariável, se esta variação independe do tamanho considerado.
- 2) A análise inicial dos dados indicou certa correlação linear entre ($X = \ln D$) e ($Y = \ln C$), que foi confirmada posteriormente com razoável aproximação. E devido a esta correlação, seguramente nenhum outro modelo tão simples como (3.3) explicaria melhor a variação do custo com o diâmetro.

Os resultados da análise de regressão serão comentados a seguir:

- os coeficientes de correlação (r) calculados estão muito próximo da unidade, podem pois serem considerados elevados. Isto indica que o grau de correlação linear entre X e Y é alto, confirmando-se assim a análise inicial.
- os coeficientes de determinação (R^2) calculados indicam que pelo menos 99% da variação do custo com o diâmetro pode ser explicada através da regressão de Y em X .
- da análise do gráfico de resíduos não rejeitamos a hipótese que a dispersão de Y é a mesma para qualquer valor fixado de X .
- as quantidades $\hat{\sigma}_r^2$ ou $\hat{\sigma}_r$ pequenas em relação aos valores de Y , indicam baixa dispersão de Y em torno da reta média, por-

tanto elevada precisão na estimativa \hat{Y} ; confirmada também pela medida de CV que mostra que $\hat{\sigma}_r$ representa apenas cerca de 1,5% de \bar{Y} .

- através do cálculo do desvio (E'), verificamos que para um D_i fixado, \hat{C}_i não é menor que C_{i-1} nem maior que C_{i+1} .
- a aproximação de centésimo na estimativa b é suficiente, e não provoca oscilações maiores que a unidade quando se estima o custo.
- a influência das oscilações nos reajustes de preços para uma mesma classe de tubos (reajustes com comportamento tipo 2) influencia muito pouco a estimativa b do parâmetro β . A influência observada recai sobre o centésimo, que já está sujeito a aproximações.

Como desde o final 1976 os reajustes de preços de tubos de condução estão regulamentados pelo C.I.P., a análise dos dados referentes a períodos anteriores a 1977 não é necessária.

O uso das equações (4.16a) a (4.21a) e dos fatores de correção (h) e ($-h$) resulta em estimações corretas de custo, exigindo apenas o conhecimento do custo ($C_{1,j}$). O uso das equações (4.31) a (4.38) está ainda limitado à verificação do comportamento dos reajustes de preços, embora os dados observados para o caso anterior possam permitir certa extrapolação ainda que cuidadosa.

Note-se ainda que as equações obtidas variam mais para as diferentes normas técnicas do que para as diferentes classes dentro de uma mesma norma. Isto pode ser verificado por comparação das equações (4.16a) e (4.17a) ou (4.16a) e (4.21a). Verificou-se ainda que os resultados obtidos para a norma EB.182 são bem diferentes das soluções encontradas na literatura.

As equações (4.16a) a (4.21a) aplicam-se a estimações de custo onde correlações para diâmetro nominal do tubo são suficientes; quando se pretende o uso das equações para, por exemplo, determinação de soluções econômicas, as equações (4.25) a (4.30) devem ser empregadas, pois neste caso a variável que interessa é o diâmeo.

tro interno do ducto.

Resta ressaltar que os custos estimados foram apresentados no capítulo anterior com precisão de um centavo apenas com o objetivo de mostrar, de forma clara, os locais onde aparecem as diferenças, embora apenas aproximações até a unidade tenham significado.

5.2 - Custo anual fixo

O item acessórios não foi considerado por falta de informação a respeito da variação de seu custo com o diâmetro. Nos trabalhos discutidos no capítulo 2, observa-se que os autores admitem variação igual a do caso dos tubos. Preferimos não assumir isto evitando desta forma possíveis desvio das condições brasileiras. Por outro lado, se posteriormente verifica-se que o comportamento é o mesmo, a simples adição de um fator à constante A_j corrige as equações.

Outro item, instalação, não foi considerado pelos motivos mencionados acima. A correção, neste caso, também é feita pela adição de um fator à constante A_j .

5.3 - Equações para otimização econômica

As seis soluções obtidas para o escoamento laminar podem ser agrupadas em dois blocos:

1. equações (4.51) a (4.54),
2. equações (4.55) e (4.56).

Os expoentes das equações (4.51) a (4.54) são ligeiramente diferentes, porém esta diferença não justifica mais que uma solução gráfica para estas equações. Pequenas diferenças não significativas na

taxa de fluxo podem ser observadas pelo uso da figura 4.15 para resolver as equações (4.52) a (4.54), mas seguramente não se comete êrro na estimação do diâmetro econômico. O mesmo aplica-se às equações (4.55) (4.56) em relação à figura 4.16.

Consideremos o exemplo de aplicação de escoamento laminar proposto por Sarchet-Colburn [24], escoamento de glicerol a 20°C, a uma taxa de fluxo de 100 galões por minuto (22,7 m³/h), viscosidade de 800 cp., e $\rho = 1272 \text{ kg/m}^3$. Usando a equação (4.51) encontramos um diâmetro econômico de 8 polegadas, usando (4.56) obtemos 6 polegadas para as condições estimadas indicadas no apêndice. A primeira solução não deve ser empregada pois o resultado não pertence ao intervalo de definição da variável D , a segunda por aproximação é igual à solução obtida por Sarchet-Colburn sem uso do fator de correção. Usando o fator de correção indicado, a solução dos autores será 5 polegadas.

Para escoamento turbulento, o mesmo pode ser dito em relação a (4.63) a (4.66), e (4.67) e (4.68). A figura 4.17 pode ser empregada para resolução das equações (4.63) a (4.66), e a figura (4.18) para (4.68) e (4.67).

Note-se que as resoluções gráficas obtidas podem ser empregadas para diversas condições de operação, pois estas variáveis aparecem em K e K' que estão variando nos gráficos.

As soluções para determinação do regime de escoamento (taxa de fluxo crítica) seguem as mesmas limitações que as soluções anteriores. Se considerarmos o mesmo exemplo anterior, a taxa de fluxo crítica calculada por (4.72) é de 34.000 galões por minuto, calculada por (4.77) é de 15.000 galões por minuto contra 16.000 galões por minuto obtidos por Sarchet-Colburn. As diferenças entre (4.72) e (4.77) são bastante acentuadas, enquanto que entre (4.77) e a solução de Sarchet-Colburn é pequena.

As relações econômicas ótimas entre custos fixo e variável determinadas podem ser empregadas para estimação de diâmetro econômico, quando alguma variável necessária ao uso das equações de otimização é desconhecida.

A tabela 4.19, resume a comparação entre os diâmetros econômicos calculados quando o fator de fricção é expresso como função apenas do número de Reynolds e, quando f é estimado pela equação de Colebrook. Observou-se uma tendência a estimações de diâmetros maiores no primeiro caso, por outro lado as figuras (4.19) e (4.20) mostram que o custo anual total varia muito pouco para os valores vizinhos ao ponto econômico. Podemos, quando estimarmos o diâmetro através das equações de otimização, aproximar para mais ou para menos o valor encontrado, de acordo com os interesses específicos de cada situação.

O método iterativo utilizado para o cálculo de f difere do proposto por CAPLAN [4], que consiste em adicionar (10^{-4}) a f_0 até que $1/\sqrt{f}$ torne-se menor que o membro direito da equação (2.14). O método desenvolvido, que consiste em trocar (f_i) por (f_{i+1}) até que $|f_{i+1} - f_i| \leq 10^{-5}$, converge rapidamente; geralmente a quarta troca já satisfaz. Seguramente o valor inicial de f , $f_0 = 0,0223 D^{-0,225}$, é responsável pela rápida convergência.

As tabelas do apêndice , permitem rápidas estimações da perda de carga e do custo variável para escoamento de água a diferentes taxas de fluxo. O fator de fricção (f) é facilmente determinado para Re e D conhecidos, para uma certa taxa de fluxo.

5.4 -- Conclusões e Sugestões

Verificamos:

1. A função ($C = C_1 D^\beta$) explica a estrutura de preços de tubulações no Brasil.
2. Determinou-se a função para tubos de aço pretos e galvanizados (E.B. 182 leve, E.B. 182 médio, ASTM-A 120 "Sch 40", e para tubos de aço inoxidável sem costura (Sch. 10:304L, 316L; Sch.40 :

304L, 316L; Sch.80 : 304L, 316L, ISO-R-65 : 304, 316).

3. A cada norma corresponde uma correlação específica.
4. A função ajustada explica pelo menos 99% da variação preço-diâmetro.
5. A correlação linear entre logaritmo do diâmetro e logaritmo do custo é da ordem de 0,995.
6. A dispersão dos pontos observados (variável dependente) em torno da reta média ajustada é pequena, da ordem de ($\hat{\sigma}_r^2 = 0,005$).
7. A dispersão da variável dependente em torno da reta ajustada é a mesma para qualquer valor fixado da variável independente.
8. A qualidade de ajustamento dos pontos observados à reta é alta.
9. A qualidade do ajuste melhora quando considera-se apenas diâmetros maiores ou igual à unidade.
10. O expoente b varia entre 1,03 a 1,55 para as diferentes normas, baseado em diâmetros nominais.
11. Estes expoentes variam entre 1,11 a 1,62, quando baseados em diâmetros internos.
12. O intervalo de variação dos expoentes é consideravelmente maior que o indicado na literatura.
13. As funções ajustadas independem do período considerado (inflação).
14. As correlações para tubos de aço inoxidável foram determinadas para preços referentes a um só período.
15. Estabelecemos equações de otimização para escoamento em regime laminar e turbulento.
16. Estas correlações foram agrupadas em dois jogos de gráficos, um para os maiores expoentes e outro para os menores.
17. Apresentamos solução gráfica para a taxa de fluxo crítica baseada nas equações obtidas. (2 gráficos)

18. Não se justifica mais que uma solução gráfica para os menores expoentes, ou para os maiores.
19. Verificamos que a aplicação de uma solução aproximada para o fator de fricção (correspondente a tubos hidraulicamente lisos), não resulta em erros comparada com a solução da equação de Colebrook.
20. Comprovou-se que o custo total mínimo corresponde a uma região e não a um ponto.

Sugestões

1. Verificar que função se aplica à variação preço-diâmetro para acessórios.
 2. Verificar como se comportam os custos de instalação para tubulações.
 3. Determinar a função de custo fixo para equipamentos de interesse na indústria de alimentos. Este estudo pode conduzir a determinação de soluções de otimização econômica ou, ao estudo da economia de escala.
 4. Desenvolver equações de otimização para fluidos não Newtonianos em regime laminar, faixa de grande interesse para a engenharia de alimentos.
-

Referências:

1. BRACA, R.M. - HAPPEL, J. (1953). "New Cost Data Bring Economic Pipe Sizing Up to Date". Chem. Eng. 60(1)180:187, jan.
2. BODMAN, S.W. (1968). The Industrial Practice of Chemical Process Engineering, cap. 5. The M.I.T. Press.
3. BOSWORTH, D.A. (1968). "Installed Costs of Outside Piping". Chem. Eng. 75(7)132:133, march 25.
4. CAPLAN, F. (1978). "Calculator Programs Solve Fluid Flow Problems". Heating, Piping, Air Conditioning. 50(10)85:87, out.
5. CHILTON, C.H. (editor) (1960). Cost Engineering In The Process Industries, cap. 2, pag. 58. McGraw-Hill.
6. COULSON, J.M. - RICHARDSON, J.F. (1970). Chemical Engineering, 2ª ed. re visada, vol. 1, cap. 3, pag. 41 a 72. Pergamon Press.
7. CRAN, J.E. (1968). "How to Estimate Piping Costs". The Chem. Eng. Nº 218 CE110:CE112, may.
8. DICKSON, R.A. (1947). "How 'N' System Simplifies Piping Cost Estimation". Chem. Eng. 54(11)121:123. nov.
9. DICKSON, R.A. (1950). "Pipe Cost Estimation". Chem. Eng. 57(1)123:135. jan.
10. DRAPER, N.R. - SMITH, H. (1966). Applied Regression Analysis. cap. 3, pag. 91 a 92. John Wiley & Sons, Inc.
11. FOUST, A.S. e outros (1960). Principles of Unit Operations, 1ª ed. re visada, pag. 157 a 158, Wiley International Edition.
12. GENEREAUX, R.P. (1937). "Fluid-Flow Design Methods". Industrial and Engineering Chemistry. 29(4)385:388.
13. HOFFMANN, R. - VIEIRAS, S. (1977). Análise de Regressão: uma introdução à econometria, cap. 2. HUCITEC.
14. KEATING, J.C. (1962). "Accurate Way to Estimate Pipe Installation Cost". Chem. Eng. 69(13)125:128, jun. 25.
15. LATORRACA, N. (1975). Legislação Tributária: uma introdução ao planejamento tributário, 3ª ed., pag. 69, São Paulo. Atlas.
16. MEYER, P.L. (1978). Probabilidade: aplicações à estatística, tradução de Ruy C.B. Lourenço Filho, Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos.

17. ONIGA, T: (1949). Calcul des Tuyaux pag. 25 a 29 e 123 á 129.
Matémine S.A.
 18. PERRY, J.H. (editor) (1963). Chemical Engineer's Handbook. 4^oed., pag. 5-28 a 5-30 e pag. 26-31. McGraw-Hill.
 19. PERRY, R.H. (1973). Chemical Engineer's Handbook. 5^oed., pag. 5-31 a 5-32. McGraw-Hill.
 20. PETER, M.S. - TIMMERHAUS, K.D. (1968). Plant Design and Economics for Chemical Engineers. 2^oed., pag. 302 a 308 e 432 a 435. McGraw-Hill.
 21. PIPE and PIPELINES. (1971). "Optimum pipeline diameters by nomogram". British Chem. Eng. 16(4/5) 313:314.
 22. PRESTO, J. - SOKOLSKI, I. (1969). "Ecuación y Diagramas de Costo de Cañerías". Montevideo, Uruguay. set.
 23. PROCESS PIPELINES. (1969). "Pipework estimating-a review". British Chem. Eng. 14(2) PPR16, PPR28, PPR30. fev.
 24. SARCHET, B.R. - COLBURN, A.P. (1940). "Economic Pipe Size-in the transportation of viscous and nonviscous fluids". Industrial and Engineering Chemistry. 32(9) 1249:1252.
 25. SHERWOOD, T.K. (1963). A course in Process Design. cap. 4. The M.I.T. Press.
 26. WRIGHT, R.E. (1950). "Materials Handling". Industrial and Engineering Chemistry. 42(10) 87A:88A, oct..
-
-

A P E N D I C E -

***VAZAO = 5.

D*	1.049	1.380	1.610	2.067	2.469	3.068	3.548	4.026	5.047	6.065
RE*	0.66E+05	0.50E+05	0.43E+05	0.34E+05	0.28E+05	0.23E+05	0.20E+05	0.17E+05	0.14E+05	0.11E+05
F*	.02514	.02480	.02482	.02517	.02563	.02642	.02707	.02772	.02904	.03027
DELTA P*	0.29E+04	0.73E+03	0.34E+03	0.99E+02	0.41E+02	0.14E+02	0.71E+01	0.39E+01	0.13E+01	0.55E+00
CVAR*	59.	15.	7.	2.	1.	0.	0.	0.	0.	0.
CTT*	65.	24.	19.	20.	25.	35.	44.	54.	77.	104.

(j=5)

D*	1.079	1.421	1.654	2.094	2.717	3.185	3.685	4.146
RE*	0.65E+05	0.49E+05	0.42E+05	0.33E+05	0.26E+05	0.22E+05	0.19E+05	0.17E+05
F*	.02508	.02479	.02484	.02520	.02595	.02658	.02726	.02788
DELTA P*	0.25E+04	0.63E+03	0.30E+03	0.93E+02	0.26E+02	0.12E+02	0.59E+01	0.34E+01
CVAR*	51.	13.	6.	2.	1.	0.	0.	0.
CTT*	55.	19.	13.	12.	14.	17.	20.	23.

(j=3)

D*	1.091	1.433	1.665	2.110	2.732	3.205	3.705	4.165
RE*	0.64E+05	0.49E+05	0.42E+05	0.33E+05	0.25E+05	0.22E+05	0.19E+05	0.17E+05
F*	.02506	.02479	.02485	.02521	.02597	.02660	.02728	.02790
DELTA P*	0.24E+04	0.61E+03	0.29E+03	0.89E+02	0.25E+02	0.12E+02	0.58E+01	0.33E+01
CVAR*	48.	12.	6.	2.	1.	0.	0.	0.
CTT*	52.	18.	13.	11.	13.	15.	17.	20.

(j=1)

D*	1.091	1.433	1.665	2.110	2.732	3.205	3.705	4.165
RE*	0.64E+05	0.49E+05	0.42E+05	0.33E+05	0.25E+05	0.22E+05	0.19E+05	0.17E+05
F*	.02506	.02479	.02485	.02521	.02597	.02660	.02728	.02790
DELTA P*	0.24E+04	0.61E+03	0.29E+03	0.89E+02	0.25E+02	0.12E+02	0.58E+01	0.33E+01
CVAR*	48.	12.	6.	2.	1.	0.	0.	0.
CTT*	52.	18.	13.	11.	13.	15.	18.	21.

(j=1)



D*	1.049	1.380	1.610	2.067	2.469	3.068	3.548	4.026	5.047	6.065
RE*	0.13E+06	0.10E+06	0.86E+05	0.67E+05	0.56E+05	0.45E+05	0.39E+05	0.35E+05	0.28E+05	0.23E+05
F*	.02393	.02313	.02287	.02273	.02284	.02320	.02357	.02397	.02485	.02571
DELTA P*	0.11E+05	0.27E+04	0.13E+04	0.36E+03	0.15E+03	0.50E+02	0.25E+02	0.13E+02	0.45E+01	0.19E+01
CVAR*	446.	109.	50.	14.	6.	2.	1.	1.	0.	0.
CTT*	452.	119.	62.	33.	30.	37.	45.	54.	77.	104.

j = 5

D*	1.079	1.421	1.654	2.094	2.717	3.185	3.685	4.146		
RE*	0.13E+06	0.98E+05	0.84E+05	0.66E+05	0.51E+05	0.44E+05	0.38E+05	0.34E+05		
F*	.02383	.02307	.02283	.02273	.02297	.02329	.02368	.02407		
DELTA P*	0.96E+04	0.24E+04	0.11E+04	0.33E+03	0.92E+02	0.42E+02	0.21E+02	0.12E+02		
CVAR*	386.	94.	44.	13.	4.	2.	1.	0.		
CTT*	390.	100.	51.	23.	17.	18.	20.	23.		

j = 3

D*	1.091	1.433	1.665	2.110	2.732	3.205	3.705	4.165		
RE*	0.13E+06	0.97E+05	0.84E+05	0.66E+05	0.51E+05	0.43E+05	0.38E+05	0.33E+05		
F*	.02379	.02306	.02283	.02273	.02298	.02330	.02370	.02409		
DELTA P*	0.91E+04	0.23E+04	0.11E+04	0.32E+03	0.89E+02	0.41E+02	0.20E+02	0.11E+02		
CVAR*	364.	90.	42.	13.	4.	2.	1.	0.		
CTT*	368.	96.	49.	22.	16.	16.	18.	20.		

j = 1

D*	1.091	1.433	1.665	2.110	2.732	3.205	3.705	4.165		
RE*	0.13E+06	0.97E+05	0.84E+05	0.66E+05	0.51E+05	0.43E+05	0.38E+05	0.33E+05		
F*	.02379	.02306	.02283	.02273	.02298	.02330	.02370	.02409		
DELTA P*	0.91E+04	0.23E+04	0.11E+04	0.32E+03	0.89E+02	0.41E+02	0.20E+02	0.11E+02		
CVAR*	364.	90.	42.	13.	4.	2.	1.	0.		
CTT*	368.	96.	49.	22.	16.	17.	19.	21.		

j = 1



4

D*	1.049	1.380	1.610	2.067	2.469	3.068	3.548	4.026	5.047	6.065
RE*	U.20E+06	0.15E+06	0.13E+06	0.10E+06	0.85E+05	0.68E+05	0.59E+05	0.52E+05	0.41E+05	0.34E+05
F*	.02348	.02249	.02209	.02170	.02164	.02177	.02199	.02226	.02291	.02358
DELTA P*	0.25E+05	0.60E+04	0.27E+04	0.77E+03	0.31E+03	0.11E+03	0.52E+02	0.28E+02	0.93E+01	0.38E+01
CVAR*	1476.	359.	163.	46.	19.	6.	3.	2.	1.	0.
CTT*	1483.	368.	175.	64.	43.	41.	47.	55.	78.	104.

j = 5

D*	1.079	1.421	1.654	2.094	2.717	3.185	3.685	4.146
RE*	0.19E+06	0.15E+06	0.13E+06	0.10E+06	0.77E+05	0.66E+05	0.57E+05	0.50E+05
F*	.02336	.02210	.02203	.02169	.02167	.02182	.02206	.02233
DELTA P*	0.21E+05	0.51E+04	0.24E+04	0.72E+03	0.19E+03	0.89E+02	0.43E+02	0.24E+02
CVAR*	1276.	309.	142.	43.	12.	5.	3.	1.
CTT*	1280.	315.	150.	53.	25.	22.	22.	24.

j = 3

D*	1.091	1.433	1.665	2.110	2.732	3.205	3.705	4.165
RE*	0.19E+06	0.15E+06	0.13E+06	0.99E+05	0.76E+05	0.65E+05	0.56E+05	0.50E+05
F*	.02332	.02238	.02202	.02169	.02167	.02183	.02207	.02234
DELTA P*	0.20E+05	0.49E+04	0.23E+04	0.69E+03	0.19E+03	0.86E+02	0.42E+02	0.24E+02
CVAR*	1205.	296.	137.	41.	11.	5.	3.	1.
CTT*	1209.	301.	144.	50.	23.	20.	20.	21.

j = 1

D*	1.091	1.433	1.665	2.110	2.732	3.205	3.705	4.165
RE*	0.19E+06	0.15E+06	0.13E+06	0.99E+05	0.76E+05	0.65E+05	0.56E+05	0.50E+05
F*	.02332	.02238	.02202	.02169	.02167	.02183	.02207	.02234
DELTA P*	0.20E+05	0.49E+04	0.23E+04	0.69E+03	0.19E+03	0.86E+02	0.42E+02	0.24E+02
CVAR*	1205.	296.	137.	41.	11.	5.	3.	1.
CTT*	1209.	302.	144.	51.	24.	20.	21.	22.

j = 1



A.5

D*	1.049	1.380	1.610	2.067	2.469	3.068	3.548	4.026	5.047	6.0
RE*	0.27E+06	0.20E+06	0.17E+06	0.13E+06	0.11E+06	0.91E+05	0.78E+05	0.69E+05	0.55E+05	0.46E+05
F*	.02325	.02214	.02166	.02113	.02094	.02093	.02105	.02123	.02173	.02227
DELTA P*	0.33E+05	0.10E+05	0.47E+04	0.13E+04	0.54E+03	0.18E+03	0.89E+02	0.47E+02	0.16E+02	0.64E+01
CVAR*	3465.	837.	379.	106.	43.	15.	7.	4.	1.	1.
CTT*	3471.	847.	391.	124.	68.	49.	51.	57.	78.	104.

D*	1.079	1.421	1.654	2.094	2.717	3.185	3.685	4.146		
RE*	0.26E+06	0.20E+06	0.17E+06	0.13E+06	0.10E+06	0.87E+05	0.76E+05	0.67E+05		
F*	.02312	.02204	.02159	.02111	.02091	.02095	.02109	.02128		
DELTA P*	0.37E+05	0.90E+04	0.41E+04	0.12E+04	0.33E+03	0.15E+03	0.73E+02	0.41E+02		
CVAR*	2993.	720.	330.	99.	27.	12.	6.	3.		
CTT*	2997.	726.	338.	109.	40.	29.	25.	26.		

D*	1.091	1.433	1.665	2.110	2.732	3.205	3.705	4.165		
RE*	0.26E+06	0.19E+06	0.17E+06	0.13E+06	0.10E+06	0.87E+05	0.75E+05	0.67E+05		
F*	.02307	.02201	.02157	.02110	.02091	.02095	.02110	.02129		
DELTA P*	0.35E+05	0.86E+04	0.40E+04	0.12E+04	0.33E+03	0.15E+03	0.72E+02	0.40E+02		
CVAR*	2825.	690.	319.	96.	26.	12.	6.	3.		
CTT*	2830.	695.	326.	104.	38.	26.	23.	23.		

D*	1.091	1.433	1.665	2.110	2.732	3.205	3.705	4.165		
RE*	0.26E+06	0.19E+06	0.17E+06	0.13E+06	0.10E+06	0.87E+05	0.75E+05	0.67E+05		
F*	.02307	.02201	.02157	.02110	.02091	.02095	.02110	.02129		
DELTA P*	0.35E+05	0.86E+04	0.40E+04	0.12E+04	0.33E+03	0.15E+03	0.72E+02	0.40E+02		
CVAR*	2825.	690.	319.	96.	26.	12.	6.	3.		
CTT*	2830.	695.	326.	105.	38.	27.	24.	24.		

j=1

j=1

j=3

D* 1.049 1.380 1.610 2.067 2.469 3.068 3.548 4.026 5.047 6.065
 RE* 0.33E+06 0.25E+06 0.22E+06 0.17E+06 0.14E+06 0.11E+06 0.98E+05 0.86E+05 0.69E+05 0.57E+05
 F* .02310 .02192 .02139 .02076 .02049 .02037 .02041 .02052 .02091 .02137
 DELTA P* 0.67E+05 0.16E+05 0.73E+04 0.20E+04 0.83E+03 0.28E+03 0.13E+03 0.72E+02 0.24E+02 0.96E+01
 CVAR* 6725. 1619. 731. 203. 83. 28. 13. 7. 2. 1.
 CTT* 6731. 1629. 743. 222. 107. 62. 57. 61. 80. 105.

D* 1.079 1.421 1.654 2.094 2.717 3.185 3.685 4.146
 RE* 0.32E+06 0.24E+06 0.21E+06 0.17E+06 0.13E+06 0.11E+06 0.94E+05 0.84E+05
 F* .02297 .02181 .02131 .02074 .02040 .02037 .02044 .02056
 DELTA P* 0.58E+05 0.14E+05 0.64E+04 0.19E+04 0.51E+03 0.23E+03 0.11E+03 0.62E+02
 CVAR* 5807. 1392. 637. 190. 51. 23. 11. 6.
 CTT* 5811. 1398. 644. 200. 64. 39. 31. 29.

D* 1.091 1.433 1.665 2.110 2.732 3.205 3.705 4.165
 RE* 0.32E+06 0.24E+06 0.21E+06 0.16E+06 0.13E+06 0.11E+06 0.94E+05 0.84E+05
 F* .02292 .02178 .02129 .02072 .02040 .02037 .02044 .02057
 DELTA P* 0.55E+05 0.13E+05 0.62E+04 0.18E+04 0.50E+03 0.22E+03 0.11E+03 0.61E+02
 CVAR* 5482. 1333. 615. 183. 50. 22. 11. 6.
 CTT* 5486. 1339. 622. 192. 62. 37. 28. 26.

D* 1.091 1.433 1.665 2.110 2.732 3.205 3.705 4.165
 RE* 0.32E+06 0.24E+06 0.21E+06 0.16E+06 0.13E+06 0.11E+06 0.94E+05 0.84E+05
 F* .02292 .02178 .02129 .02072 .02040 .02037 .02044 .02057
 DELTA P* 0.55E+05 0.13E+05 0.62E+04 0.18E+04 0.50E+03 0.22E+03 0.11E+03 0.61E+02
 CVAR* 5482. 1333. 615. 183. 50. 22. 11. 6.
 CTT* 5486. 1339. 622. 192. 62. 37. 29. 27.



7

D*	1.039	1.380	1.610	2.067	2.469	3.068	3.548	4.026	5.047	6.065
RE*	0.40E+06	0.30E+06	0.26E+06	0.20E+06	0.17E+06	0.14E+06	0.12E+06	0.10E+06	0.83E+05	0.69E+05
F*	.02301	.02177	.02121	.02050	.02017	.01996	.01994	.02001	.02030	.02068
DELTA P*	0.96E+05	0.23E+05	0.10E+05	0.29E+04	0.12E+04	0.39E+03	0.19E+03	0.10E+03	0.33E+02	0.13E+02
CVAR*	11572.	2779.	1253.	347.	140.	47.	23.	12.	4.	2.
CTT*	11578.	2789.	1265.	365.	165.	82.	66.	66.	81.	105.

j=5

D*	1.079	1.421	1.654	2.094	2.717	3.185	3.685	4.146
RE*	0.39E+06	0.29E+06	0.25E+06	0.20E+06	0.15E+06	0.13E+06	0.11E+06	0.10E+06
F*	.02287	.02166	.02112	.02047	.02005	.01995	.01996	.02003
DELTA P*	0.83E+05	0.20E+05	0.91E+04	0.27E+04	0.72E+03	0.32E+03	0.16E+03	0.87E+02
CVAR*	9989.	2388.	1090.	325.	87.	39.	19.	10.
CTT*	9994.	2394.	1097.	335.	100.	55.	38.	33.

j=3

D*	1.091	1.433	1.665	2.110	2.732	3.205	3.705	4.165
RE*	0.38E+06	0.29E+06	0.25E+06	0.20E+06	0.15E+06	0.13E+06	0.11E+06	0.10E+06
F*	.02281	.02163	.02110	.02045	.02004	.01995	.01996	.02004
DELTA P*	0.79E+05	0.19E+05	0.88E+04	0.26E+04	0.70E+03	0.31E+03	0.15E+03	0.85E+02
CVAR*	9430.	2286.	1053.	312.	84.	38.	18.	10.
CTT*	9434.	2292.	1060.	321.	96.	52.	36.	30.

j=1

D*	1.091	1.433	1.665	2.110	2.732	3.205	3.705	4.165
RE*	0.38E+06	0.29E+06	0.25E+06	0.20E+06	0.15E+06	0.13E+06	0.11E+06	0.10E+06
F*	.02281	.02163	.02110	.02045	.02004	.01995	.01996	.02004
DELTA P*	0.79E+05	0.19E+05	0.88E+04	0.26E+04	0.70E+03	0.31E+03	0.15E+03	0.85E+02
CVAR*	9430.	2286.	1053.	312.	84.	38.	18.	10.
CTT*	9434.	2292.	1060.	322.	97.	53.	36.	31.

j=1



8

D*	1.049	1.380	1.610	2.067	2.469	3.068	3.548	4.026	5.047	6.065
RE*	0.46E+06	0.35E+06	0.30E+06	0.24E+06	0.20E+06	0.16E+06	0.14E+06	0.12E+06	0.97E+05	0.80E+05
F*	.02294	.02166	.02107	.02031	.01993	.01965	.01959	.01961	.01982	.02015
DELTA P*	0.13E+06	0.31E+05	0.14E+05	0.39E+04	0.16E+04	0.52E+03	0.25E+03	0.13E+03	0.44E+02	0.18E+02
CVAR*	18323.	4392.	1976.	546.	220.	73.	35.	19.	6.	2.
CTT*	18329.	4401.	1988.	564.	245.	108.	79.	72.	83.	106.

j=5

D*	1.079	1.421	1.654	2.094	2.717	3.185	3.685	4.146
RE*	0.45E+06	0.34E+06	0.29E+06	0.23E+06	0.18E+06	0.15E+06	0.13E+06	0.12E+06
F*	.02280	.02154	.02098	.02028	.01978	.01962	.01959	.01963
DELTA P*	0.11E+06	0.27E+05	0.12E+05	0.36E+04	0.97E+03	0.43E+03	0.21E+03	0.12E+03
CVAR*	15814.	3773.	1719.	511.	136.	61.	29.	16.
CTT*	15819.	3779.	1727.	521.	149.	77.	49.	39.

j=3

D*	1.091	1.433	1.665	2.110	2.732	3.205	3.705	4.165
RE*	0.45E+06	0.34E+06	0.29E+06	0.23E+06	0.18E+06	0.15E+06	0.13E+06	0.12E+06
F*	.02274	.02151	.02095	.02026	.01977	.01962	.01959	.01963
DELTA P*	0.11E+06	0.26E+05	0.12E+05	0.35E+04	0.94E+03	0.42E+03	0.20E+03	0.11E+03
CVAR*	14927.	3612.	1661.	491.	132.	59.	28.	16.
CTT*	14931.	3617.	1668.	500.	144.	73.	46.	36.

j=1

D*	1.091	1.433	1.665	2.110	2.732	3.205	3.705	4.165
RE*	0.45E+06	0.34E+06	0.29E+06	0.23E+06	0.18E+06	0.15E+06	0.13E+06	0.12E+06
F*	.02274	.02151	.02095	.02026	.01977	.01962	.01959	.01963
DELTA P*	0.11E+06	0.26E+05	0.12E+05	0.35E+04	0.94E+03	0.42E+03	0.20E+03	0.11E+03
CVAR*	14927.	3612.	1661.	491.	132.	59.	28.	16.
CTT*	14931.	3617.	1668.	501.	144.	74.	46.	37.

j=1



6
 DELTA P* 0.17E+06 0.41E+05 0.18E+05 0.51E+04 0.20E+04 0.68E+03 0.32E+03 0.17E+03 0.56E+02 0.23E+02
 CVAR* 27286. 6530. 2935. 809. 326. 108. 52. 28. 9. 4.
 CTT* 27292. 6540. 2947. 828. 350. 143. 96. 81. 86. 107.

j=5

D* 1.079 1.421 1.654 2.094 2.717 3.185 3.685 4.146
 RE* 0.52E+06 0.39E+06 0.34E+06 0.27E+06 0.20E+06 0.17E+06 0.15E+06 0.13E+06
 F* 0.2274 0.2146 0.2087 0.2012 0.1957 0.1937 0.1929 0.1930
 DELTA P* 0.15E+06 0.35E+05 0.16E+05 0.47E+04 0.13E+04 0.56E+03 0.27E+03 0.15E+03
 CVAR* 23547. 5609. 2553. 757. 200. 90. 43. 24.
 CTT* 23552. 5615. 2560. 767. 214. 106. 63. 46.

j=3

D* 1.091 1.433 1.665 2.110 2.732 3.205 3.705 4.165
 RE* 0.51E+06 0.39E+06 0.33E+06 0.26E+06 0.20E+06 0.17E+06 0.15E+06 0.13E+06
 F* 0.2268 0.2142 0.2084 0.2010 0.1956 0.1937 0.1930 0.1930
 DELTA P* 0.14E+06 0.34E+05 0.15E+05 0.45E+04 0.12E+04 0.54E+03 0.26E+03 0.15E+03
 CVAR* 22225. 5369. 2467. 728. 195. 87. 42. 23.
 CTT* 22230. 5375. 2474. 737. 207. 101. 59. 43.

j=1

D* 1.091 1.433 1.665 2.110 2.732 3.205 3.705 4.165
 RE* 0.51E+06 0.39E+06 0.33E+06 0.26E+06 0.20E+06 0.17E+06 0.15E+06 0.13E+06
 F* 0.2268 0.2142 0.2084 0.2010 0.1956 0.1937 0.1930 0.1930
 DELTA P* 0.14E+06 0.34E+05 0.15E+05 0.45E+04 0.12E+04 0.54E+03 0.26E+03 0.15E+03
 CVAR* 22225. 5369. 2467. 728. 195. 87. 42. 23.
 CTT* 22230. 5375. 2474. 737. 207. 102. 60. 44.

j=1



D*	1.049	1.380	1.610	2.067	2.469	3.068	3.548	4.026	5.047	6.065
RE*	0.60E+06	0.45E+06	0.39E+06	0.30E+06	0.25E+06	0.20E+06	0.18E+06	0.16E+06	0.12E+06	0.10E+06
F*	.02284	.02152	.02088	.02004	.01959	.01921	.01908	.01904	.01913	.01936
DELTA P*	0.22E+06	0.52E+05	0.23E+05	0.64E+04	0.26E+04	0.85E+03	0.41E+03	0.22E+03	0.70E+02	0.28E+02
CVAR*	38779.	92272.	4163.	1145.	460.	152.	73.	39.	13.	5.
CTT*	38785.	9282.	4175.	1164.	485.	187.	117.	92.	90.	109.

j=5

D*	1.079	1.421	1.654	2.094	2.717	3.185	3.685	4.146
RE*	0.58E+06	0.44E+06	0.38E+06	0.30E+06	0.23E+06	0.20E+06	0.17E+06	0.15E+06
F*	.02270	.02139	.02078	.02000	.01940	.01917	.01906	.01904
DELTA P*	0.19E+06	0.44E+05	0.20E+05	0.60E+04	0.16E+04	0.70E+03	0.34E+03	0.19E+03
CVAR*	33462.	7961.	3620.	1071.	283.	126.	60.	34.
CTT*	33466.	7967.	3627.	1081.	296.	143.	80.	56.

j=3

D*	1.091	1.433	1.665	2.110	2.732	3.205	3.705	4.165
RE*	0.57E+06	0.44E+06	0.38E+06	0.30E+06	0.23E+06	0.20E+06	0.17E+06	0.15E+06
F*	.02264	.02135	.02076	.01998	.01939	.01916	.01905	.01904
DELTA P*	0.18E+06	0.42E+05	0.19E+05	0.57E+04	0.15E+04	0.68E+03	0.33E+03	0.18E+03
CVAR*	31582.	7620.	3498.	1030.	275.	122.	59.	33.
CTT*	31586.	7626.	3505.	1039.	287.	137.	76.	53.

j=1

D*	1.091	1.433	1.665	2.110	2.732	3.205	3.705	4.165
RE*	0.57E+06	0.44E+06	0.38E+06	0.30E+06	0.23E+06	0.20E+06	0.17E+06	0.15E+06
F*	.02264	.02135	.02076	.01998	.01939	.01916	.01905	.01904
DELTA P*	0.18E+06	0.42E+05	0.19E+05	0.57E+04	0.15E+04	0.68E+03	0.33E+03	0.18E+03
CVAR*	31582.	7620.	3498.	1030.	275.	122.	59.	33.
CTT*	31586.	7626.	3505.	1039.	287.	137.	77.	53.

j=1

A.11

D*	1.049	1.380	1.610	2.067	2.469	3.068	3.548	4.026	5.047	6.065
RE*	0.66E+06	0.50E+06	0.43E+06	0.34E+06	0.28E+06	0.23E+06	0.20E+06	0.17E+06	0.14E+06	0.11E+06
F*	.02281	.02147	.02082	.01994	.01947	.01905	.01889	.01882	.01886	.01905
DELTA P*	0.27E+06	0.63E+05	0.28E+05	0.78E+04	0.31E+04	0.10E+04	0.50E+03	0.26E+03	0.85E+02	0.34E+02
CVAR*	53115.	12687.	5692.	1564.	628.	207.	99.	53.	17.	7.
CTT*	53121.	12697.	5704.	1582.	652.	242.	143.	106.	94.	111.

D*	1.079	1.421	1.654	2.094	2.717	3.185	3.685	4.146	j=3
RE*	0.65E+06	0.49E+06	0.42E+06	0.33E+06	0.26E+06	0.22E+06	0.19E+06	0.17E+06	
F*	.02206	.02134	.02071	.01991	.01926	.01900	.01886	.01881	
DELTA P*	0.23E+06	0.54E+05	0.25E+05	0.73E+04	0.19E+04	0.86E+03	0.41E+03	0.23E+03	
CVAR*	45829.	10894.	4949.	1462.	385.	171.	82.	45.	
CTT*	45833.	10900.	4957.	1472.	398.	188.	102.	68.	

D*	1.091	1.433	1.665	2.110	2.732	3.205	3.705	4.165	j=1
RE*	0.64E+06	0.49E+06	0.42E+06	0.33E+06	0.25E+06	0.22E+06	0.19E+06	0.17E+06	
F*	.02200	.02130	.02069	.01988	.01925	.01899	.01886	.01881	
DELTA P*	0.22E+06	0.52E+05	0.24E+05	0.70E+04	0.19E+04	0.83E+03	0.40E+03	0.22E+03	
CVAR*	43253.	10428.	4782.	1406.	374.	166.	80.	44.	
CTT*	43257.	10433.	4789.	1415.	386.	181.	97.	64.	

D*	1.091	1.433	1.665	2.110	2.732	3.205	3.705	4.165	j=1
RE*	0.64E+06	0.49E+06	0.42E+06	0.33E+06	0.25E+06	0.22E+06	0.19E+06	0.17E+06	
F*	.02260	.02130	.02069	.01988	.01925	.01899	.01886	.01881	
DELTA P*	0.22E+06	0.52E+05	0.24E+05	0.70E+04	0.19E+04	0.83E+03	0.40E+03	0.22E+03	
CVAR*	43253.	10428.	4782.	1406.	374.	166.	80.	44.	
CTT*	43257.	10433.	4789.	1415.	387.	181.	98.	65.	

