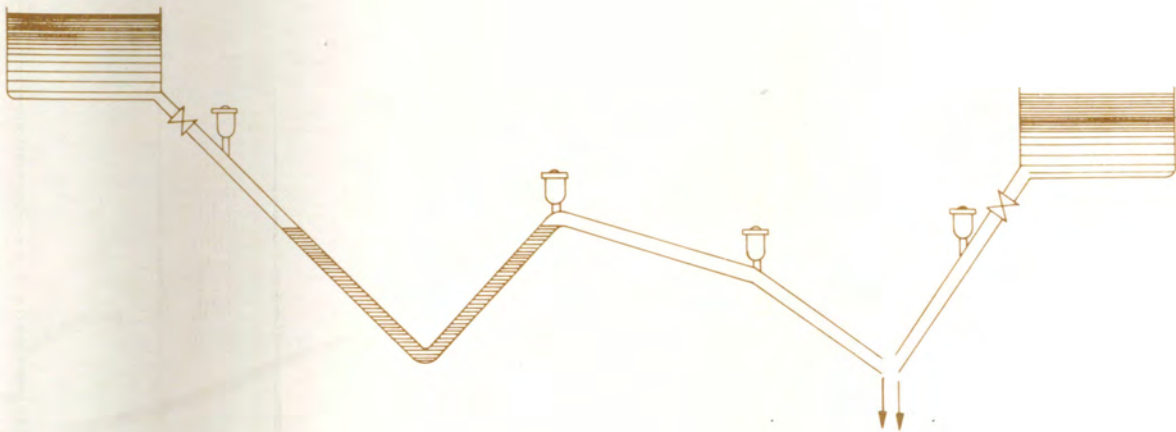


MACEIÓ, 18 A 23 DE AGOSTO DE 1985
ABES – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL

Otimização do dimensionamento estrutural de tubulações, em função da posição das ventosas de admissão.



ENGº IBRAHIM LASMAR
ENGº MIGUEL FERNANDEZ Y FERNANDEZ
TECNOSOLO

MACEIÓ, 18 A 23 DE AGOSTO DE 1985
ABES – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL

**OTIMIZAÇÃO DO DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL DE
TUBULAÇÕES, EM FUNÇÃO DA POSIÇÃO DAS
VENTOSAS DE ADMISSÃO**

TEMA: ABASTECIMENTO DE ÁGUA

ENGº IBRAHIM LASMAR
ENGº MIGUEL FERNÁNDEZ Y FERNÁNDEZ

ENDEREÇO PARA CORRESPONDÊNCIA

RUA PEDRO ALVES Nº 15
20.220 – RIO DE JANEIRO – RJ
ATT. ENGº MIGUEL FERNÁNDEZ
A/C TECNOSOLO S.A.
TEL.: (021) 223-4277 TELEX: (021) 21414

APRESENTAÇÃO DOS AUTORES:

IBRAHIM LASMAR

Engenheiro Civil, formado em 1951 pela Escola Nacional de Engenharia, nascido em 1916, na Cidade de Napomuceno – MG, residente em Niterói – RJ, possuindo vários cursos de especialização na área de hidráulica e saneamento. Trabalhou em diversos órgãos como engenheiro, professor e consultor. Destacando-se:

- Comissão de Águas e Engenharia Sanitária do antigo Estado do Rio de Janeiro (período 1952–1969): Engenheiro, Orientador Técnico de Engenharia Sanitária, Chefe da Seção de Estudos, Assistente do Diretor Técnico, Diretor Técnico, Assistente e Substituto do Diretor-Presidente.
- Cia. de Distritos Industriais – CODIN–RJ (1969/1971): Assessor Técnico.
- Universidade Federal Fluminense (1957–1958): Professor da Cadeira “Tratamento de Água e Esgotos”, do Curso de Especialização em Engenharia Sanitária.
- Universidade Federal Fluminense: Professor de Física, desde 1963 e Diretor do Instituto de Física (1971–1975).
- Universidade Federal Fluminense (1975–atual): Diretor da Divisão de Obras, Gerente do Grupo de Construção e Administração do Escritório do Campus, Presidente da Comissão de Licitações.
- Universidade Federal do Rio de Janeiro (1959–1963): Professor da disciplina “Abastecimento de Água”, do Curso de Aperfeiçoamento em Obras Hidráulicas.
- Consultor Técnico de diversas empresas de engenharia, desde 1969: CENSA – Consultores de Engenharia Sanitária S.C., Soumayer Engenharia Ltda., Natron Consultoria e Projetos S.A., Internacional de Engenharia S.A., Yamagata Engenharia S.A. e TECNOSOLO S.A.

Participou, em sua vida profissional, de mais de 150 projetos e/ou obras para diversos Estados brasileiros e para o Exterior, nas áreas de engenharia sanitária, energia elétrica, industrial e construção civil.

Trabalhos publicados: “Plano de Obras Sanitárias do Governo do Estado do Rio de Janeiro para o período de 1967–1971”.

MIGUEL FERNÁNDEZ Y FERNÁNDEZ

Engenheiro Civil, opção Hidráulica e Saneamento, formado em 1970 pela Escola de Engenharia da UFRJ, pós-graduação em Irrigação no Instituto de Hidrologia de Madrid (1976). Nascido em 1947, no Rio de Janeiro – RJ, onde reside. Possui vários cursos de especialização na área de hidráulica e saneamento e urbanismo, no Brasil e no Exterior. Trabalhou em diversos órgãos como engenheiro, consultor e professor, destacando-se:

- TECNOSOLO S.A. – Coordenador de Empreendimentos 1985–atual.
- Internacional de Engenharia S.A. – IESA – Responsável Técnico em Engenharia Civil, Coordenador de Projetos, Gerente Comercial, Chefe de Seção, engenheiro (1977-1985).
- Montreal Engenharia S.A. – Estagiário, Engenheiro, Chefe de Seção (1969–1971 e 1975–1977).
- Pontifícia Universidade Católica – PUC–Rio – Professor do Curso de Engenharia na disciplina de Hidráulica (1981–1982).
- SOTEP – Sociedade Técnica de Engenharia e Planejamento – Consultor.
- FEEMA – Professor de Cursos (1977 e 1981).
- IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração – Professor de Cursos (1983).
- COMASP – SABESP – Engenheiro Especialista (1972–1974).
- OESA – Organização e Engenharia S.A. – Consultor.
- ECP/Encibra S.A. – Engenheiro e Diretor Técnico (1971–1972).

Participou em sua vida profissional de mais de 60 projetos, planejamentos e gerenciamentos, para diversos estados brasileiros e no exterior, nas áreas de engenharia sanitária, energia elétrica, industrial, mineração, petróleo, petro-química, transportes, off-shore e construção civil.

Na área de engenharia hidráulico-sanitária, apresentou 4 (quatro) trabalhos em congressos e publicou 3 (três) apostilas.

É sócio da ABES, da AWWA, da WPCF e do Clube de Engenharia do Rio de Janeiro.

Foi membro do Conselho Diretor da ABES Nacional, é Vice-Presidente da ABES–RJ, e foi Chefe da Divisão Técnica de Engenharia do Ambiente do Clube de Engenharia.

ÍNDICE

	<u>PÁGINA</u>
1. INTRODUÇÃO	1
2. DESCRIÇÃO	4
3. DIMENSIONAMENTO	10
4. COMPARAÇÃO ECONÔMICA	33
5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	36
6. BIBLIOGRAFIA	37

SUMÁRIO

A posição das ventosas de admissão no perfil das tubulações, não apenas em pontos altos como se vê usualmente, exerce influência nas subpressões operacionais ou acidentais. O posicionamento criterioso desses acessórios reflete-se nos custos da tubulação, por vezes de forma acentuada.

1. INTRODUÇÃO

No dimensionamento estrutural de uma tubulação para condução de água, no caso de apoio contínuo sobre o terreno, as solicitações a considerar correspondem aos esforços internos e externos, os primeiros atuando de dentro para fora e os segundos de fora para dentro da tubulação.

O esforço interno é representado pela pressão máxima que pode vir a ser exercida pelo líquido sobre as paredes do tubo, em cada ponto ou trecho da linha. Nos casos de tubulações funcionando por recalque, a pressão interna máxima a considerar é aquela que corresponde à sobrepressão máxima causada pelos transientes hidráulicos, sendo geralmente preponderante à devida à parada dos conjuntos de bombeamento.

Nas tubulações que funcionam por gravidade, a pressão interna máxima em cada ponto é geralmente, a pressão hidrostática. Nos casos pouco comuns de existirem válvulas de fechamento rápido, a pressão máxima pode vir a ser aquela devida à sobrepressão resultante do transiente provocado pela operação da válvula.

Conhecida a pressão interna máxima a considerar, o dimensionamento estrutural da tubulação é rapidamente obtido pela expressão:

$$e = \frac{p \cdot D}{2 \Gamma} + e'$$

- onde: p = pressão interna
D = diâmetro da tubulação
 Γ = tensão de trabalho admissível para o material da tubulação
e' = sobre-espessura adotada para prevenir desgaste devido à corrosão
e = espessura a adotar

Os esforços externos, exercidos de fora para dentro da tubulação, são de diversas naturezas, a saber:

- a) cargas permanentes, correspondentes ao peso da tubulação, peso do recobrimento de terra e empuxos horizontais exercidos pelo terreno adjacente;
- b) carga accidental ou carga viva, causada pela movimentação de veículos sobre o recobrimento da tubulação;
- c) subpressão (pressão interna menor que a atmosférica) causada por transientes hidráulicos ou à eventualidade da linha piezométrica cortar o perfil da tubulação.

Os esforços dos grupos "a" e "b", acrescidos da reação do terreno de apoio da tubulação, podem ser expressos sob a forma de pressões externas, variáveis ou contínuas ao longo do perímetro da seção transversal do tubo. Para o dimensionamento estrutural da tubulação para resistir a esses esforços, são bastante conhecidos os métodos, formulários e tabelas apropriadas, aplicadas com a consideração da tubulação vazia.

A resistência de uma tubulação à pressão externa, do mesmo modo que à interna, depende do diâmetro, espessura da parede e tensão admissível para o material de que é feito o tubo. Ao valor máximo da pressão externa admissível, para determinada tubulação, denominamos de "pressão de colapso".

O dimensionamento estrutural consiste, então, em se determinar a pressão externa máxima a que a tubulação poderá ficar sujeita, considerando todos os esforços solicitantes e procurar fazer com que ela fique menor que a pressão de colapso. Em caso de necessidade, três são as soluções a adotar: aumentar a espessura da parede do tubo ou dimensionamento estrutural equivalente, utilizar material mais resistente, ou utilizar meios ou dispositivos capazes de reduzir a subpressão interna.

Os esforços referidos nas alíneas "a" e "b" podem ser atenuados. Os primeiros diminuindo a profundidade de assentamento da tubulação, os segundos aumentando essa profundidade ou locando a tubulação em faixas não sujeitas a trânsito. Estas providências, na maioria das vezes, não podem ser adotadas por questões de funcionamento hidráulico, de imposições de locação ou de custo.

Para atenuar o efeito causado pelas subpressões devidas a transientes hidráulicos (partida ou parada de bombeamento, abertura ou fechamento de válvula), existem aparelhos e dispositivos especiais com a finalidade de injetar ou permitir a admissão no interior da tubulação de ar ou preferencialmente de água, quando da ocorrência da subpressão.

Também são utilizados dispositivos de admissão de ar, nos pontos altos do perfil da tubulação, para atender às necessidades operacionais, durante o esvaziamento da linha.

Normalmente não se verifica o dimensionamento das tubulações quanto ao colapso por subpressão ocasionada pela abertura rápida de válvula de descarga ou de parada, inclusive por acidente, bem como por rompimento da tubulação em pontos baixos da linha. Nos casos em que se verifica o dimensionamento quanto aos efeitos dessas situações, combate-se o problema geralmente com a instalação de válvulas de admissão de ar nos pontos altos da linha, normalmente acopladas a dispositivo de expulsão de ar (ventosa de duplo efeito).

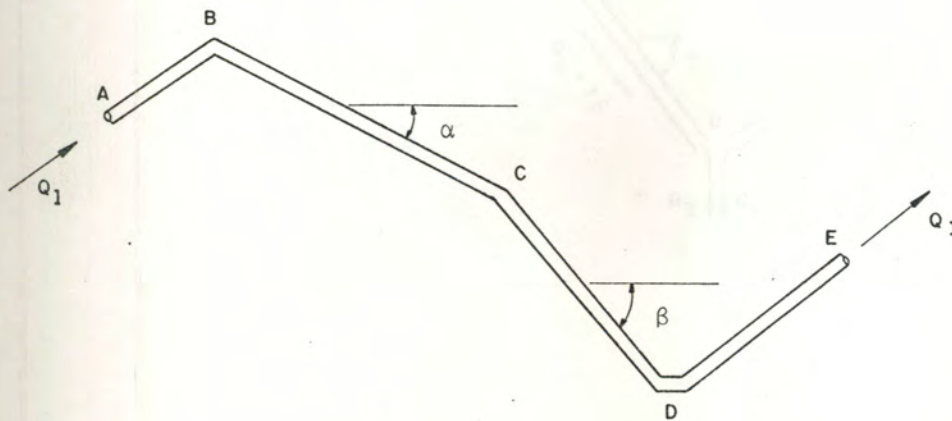
O problema é bastante significativo em tubulações de grandes diâmetros e paredes finas e, como se demonstra a seguir, a adequada localização e cálculo dos dispositivos de admissão, altera substancialmente os resultados, principalmente sob o aspecto econômico.

2. DESCRIÇÃO

A seleção do diâmetro necessário para as ventosas de admissão é baseada na subpressão resultante de situações operacionais ou acidentais tidas como críticas, tais como o rompimento da linha, a abertura rápida de válvulas de descarga ou de seccionamento por manobra indevida ou falha mecânica.

Para ilustrar como é escolhido o diâmetro de uma ventosa de admissão, considere-se um perfil típico de um trecho de tubulação, no qual existe uma mudança de declividade no perfil. Também se considera que a parte superior BC do tubo tem uma declividade (α) menor que a da parte inferior CD (β) (concavidade para baixo).

FIGURA 2-1
OPERAÇÃO NORMAL

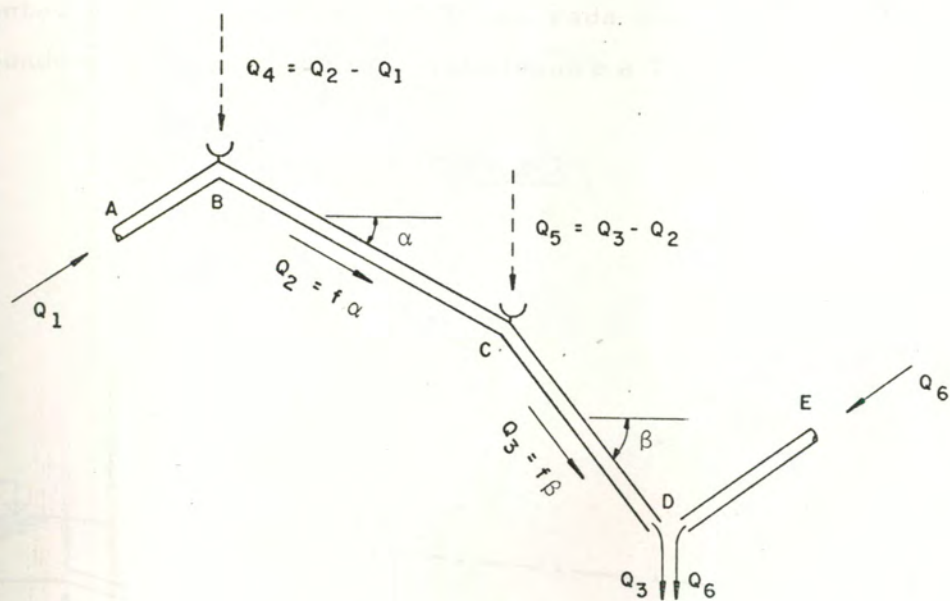


Rompendo-se a linha no ponto mais baixo, o fluxo de água tende a ser maior (mais rápido), no trecho inferior CD (de maior declividade) do que no trecho superior BC (de menor declividade).

No ponto de mudança de declividade, tenderá a haver uma separação da coluna d'água, formando-se um "vácuo", ou melhor, uma subpressão, que corresponde à diferença desses dois "fluxos" de água dos trechos superior e inferior, com declividades desiguais, podendo-se estabelecer os equilíbrios (ou igualdades) apresentados na figura 2-2, com base na equação da continuidade.

FIGURA 2-2

MOMENTO DO ROMPIMENTO EM "D"



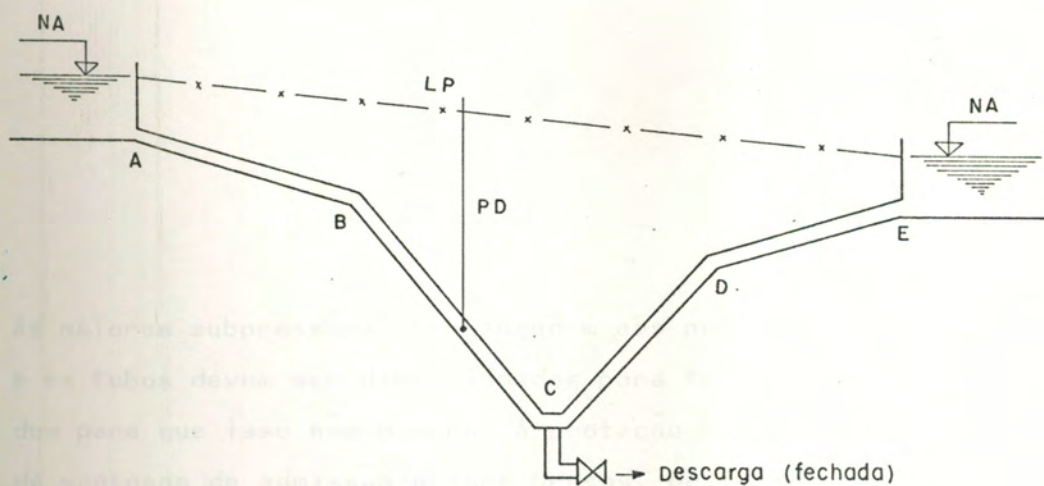
Evidentemente pode-se eliminar a ventosa de admissão em C desde que a estrutura do tubo, especialmente no entorno de C resista às subpressões resultantes e admitindo a ventosa de admissão em B dimensionada para admitir a vazão total calculada para o trecho BD, menos Q_1 . Cabe observar que Q_1 pode tornar-se zero em algumas configurações (ver Figura 2-8).

Note-se ainda, que os trechos DC e CB devem resistir a subpressão resultante da primeira onda de subpressão que se propagará de baixo para cima até abrir as ventosas de admissão. A análise desta e outras situações, dá-se a seguir com o traçado de alguns perfis teóricos onde se representa a linha piezométrica e em seguida com a apresentação de casos concretos (exemplos):

Seja o perfil apresentado na Figura 2-3:

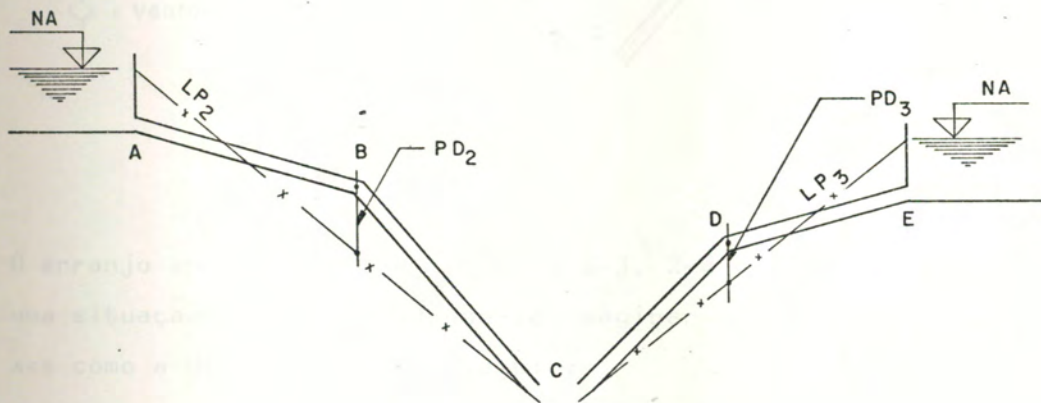
Nas condições de operação normal a Linha Piezométrica corresponde a LP, representada no desenho unindo os níveis de montante e jusante. A pressão dinâmica "PD" em cada ponto da tubulação corresponde à distância entre a tubulação e a LP.

FIGURA 2-3



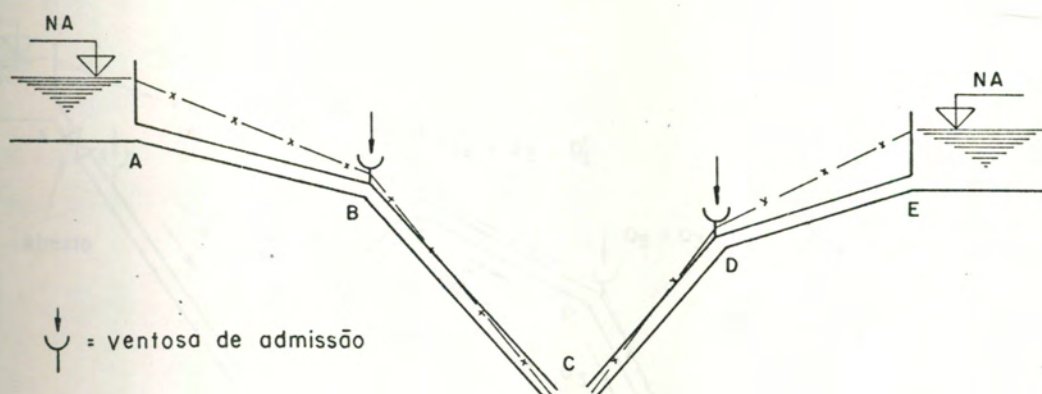
No caso de um rompimento ou abertura inadequada de válvula no ponto C, ocorreria a seguinte configuração (Figura 2-4):

FIGURA 2-4



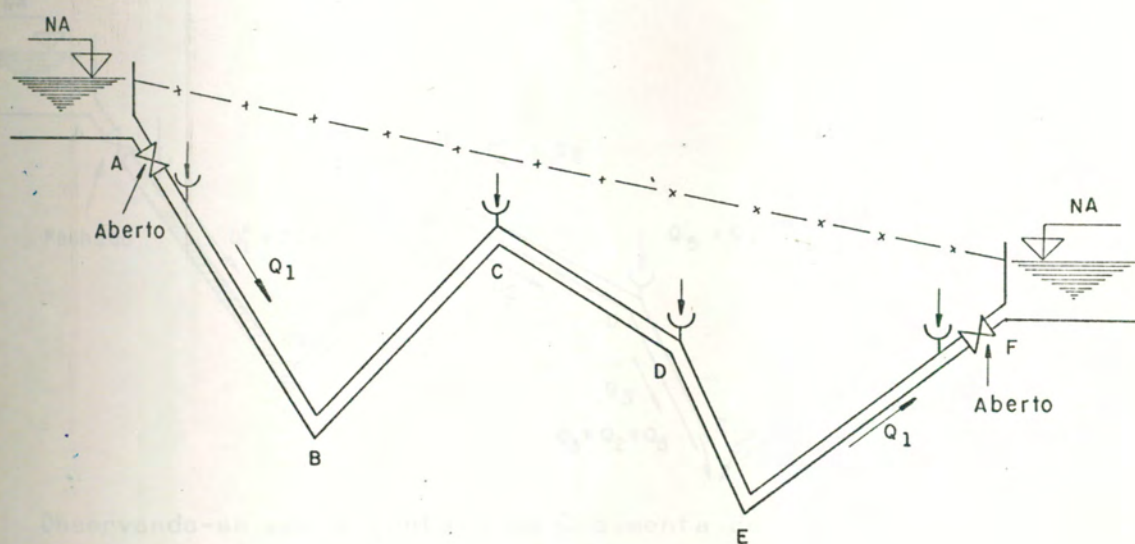
As maiores subpressões correspondem aos pontos B (PD₂) e D (PD₃) e os tubos devem ser dimensionados para tal situação, ou protegidos para que isso não ocorra. A proteção refere-se à colocação de ventosas de admissão nesses pontos, de forma que a configuração do esquema apresentado seja o da Figura 2-5 a seguir.

FIGURA 2-5



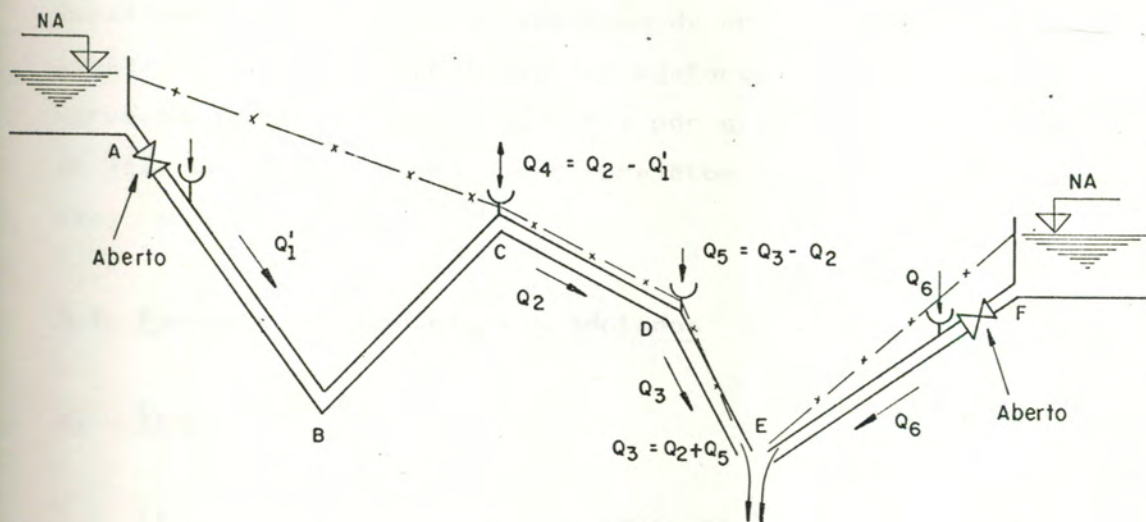
O arranjo apresentado nas figuras 2-3, 2-4 e 2-5 corresponde a uma situação simples, podendo-se imaginar situações mais complexas como a da Figura 2-6 a seguir:

FIGURA 2-6



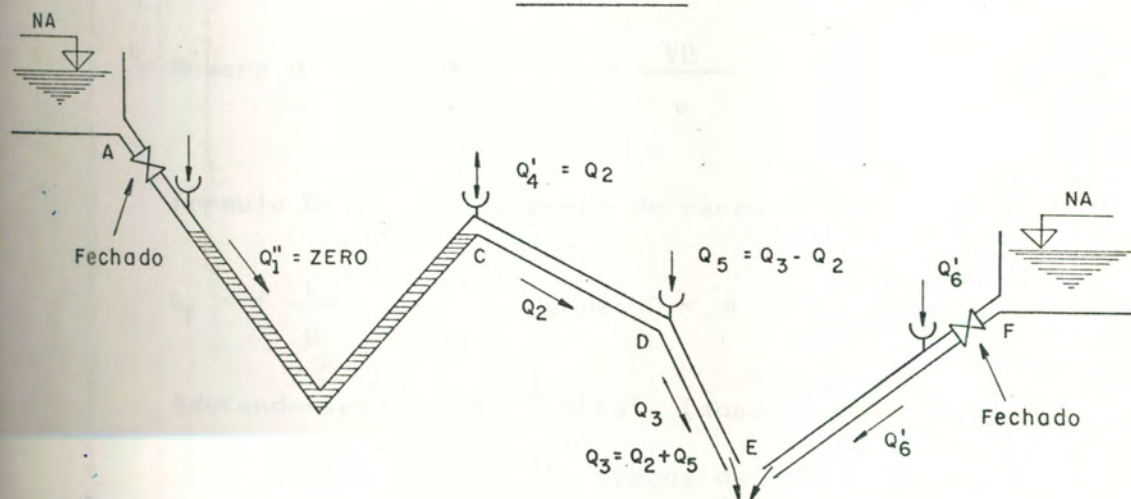
Admitindo-se o rompimento em "E", a configuração seria:

FIGURA 2-7



Como nessas circunstâncias é possível que o pessoal da operação feche as válvulas de saída junto aos reservatórios "A" e "F", a configuração vai evoluir para a situação mostrada na Figura 2-8 (caso a operação não feche os registros mas os reservatórios fiquem vazios, o resultado será o mesmo dos registros fechados):

FIGURA 2-8



Observando-se que a ventosa em C aumenta de capacidade para atender ao período de esvaziamento do trecho CE.

3. DIMENSIONAMENTO

Apresentaremos, a seguir, alguns exemplos de dimensionamento e localização de ventosas de admissão de ar, que resultaram em sensíveis economias na tubulação das adutoras. Os referidos exemplos correspondem a trechos de adutoras por gravidade, em tubulação de aço, tendo sido extraídos de projetos elaborados pelos autores, nos últimos anos.

3.1. Parâmetros e Formulários Adotados

a) Vazões

As vazões de escoamento da água, ao longo dos diversos trechos das adutoras, foram calculadas com utilização de unidades do Sistema Internacional (SI), pelas seguintes fórmulas:

- Equação de Colebrook:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(0,27 \frac{K}{D} + \frac{2,51}{R \sqrt{f}} \right)$$

- Número de Reynolds: $R = \frac{VD}{\nu}$

- Fórmula Universal da perda de carga:

$$h_f = f \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2g}, \text{ donde: } Q = \pi \frac{D^2}{4} \sqrt{\frac{2g Dh_f}{f}}$$

Adotando-se: $\nu = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}^2$ (água a 20°C)

$k = 10^{-4} \text{ m}$ (tubos de aço revestidos, novos)

b) Pressões de Colapso

Denomina-se "pressão de colapso" à pressão radial uniforme externa, convencionada negativa, a que a tubulação é capaz de resistir. Os valores utilizados foram extraídos da Tabela 6.2 da publicação "Steel Pipe Design and Installation", manual M.11, da AWWA, para tubos de aço ASTM-A283, grau B, tendo-se adotado coeficiente de segurança igual a 1,50.

Os valores admissíveis para a pressão de colapso, expressos em "mca" (metros de coluna de água) estão indicados no Quadro 3.1-1.

QUADRO 3.1-1

DIÂMETRO (mm)	ESPESSURA DA CHAPA (polegada)	PRESSÃO DE COLAPSO (mca)
1100	1/4	4,3
1100	5/16	8,4
1100	3/8	14,5
1000	1/4	5,6
1000	5/16	10,7
1000	3/8	18,2
800	7/32	7,4
800	1/4	10,7
800	5/16	20,5

c) Ventosas

A capacidade de admissão de ar das ventosas, expressa em termos de vazão, é função do diâmetro e das características

da ventosa, bem como da pressão a montante da mesma, correspondente a uma pressão negativa no interior da tubulação.

Os catálogos dos fabricantes de ventosas apresentam ábacos, com as curvas de vazão, em função da pressão, para cada diâmetro de ventosa. Os valores utilizados foram os das ventosas de fabricação Aramfarpa, série AF.145, transformados em unidades SI. O quadro abaixo apresenta as vazões de admissão de ar, expressas em m^3/s :

QUADRO 3.1-2

PRESSÃO EXTERNA (mca)	DIÂMETRO DA VENTOSA		
	200 mm	150 mm	100 mm
1,40	2,96	1,28	0,62
1,75	3,43	1,51	0,71
2,10	3,79	1,70	0,80
2,45	4,02	1,87	0,87
2,80	4,26	2,04	0,94
3,15	4,59	2,20	0,99
3,50	4,84	2,37	1,04
3,85	5,10	2,53	1,09
4,20	5,35	2,67	1,14
4,55	5,60	2,81	1,18
4,90	5,79	2,96	1,22

Apesar de alguns catálogos de ventosas indicarem capacidade de admissão de ar ainda crescentes para pressões negativas acima de 4,9 mca (7 psig), deve-se notar que aproximadamente a esta pressão, o ar penetra na tubulação à velocidade sônica, não havendo a partir daí acréscimo de vazão, ainda que a tubulação seja capaz de resistir a pressões negativas mais elevadas.

3.2. Exemplo nº 1

Trata-se de um trecho de adutora por gravidade (extensão 2983 m) em tubulação de aço, diâmetro 800 mm, espessura de chapa 7/32" (5,56 mm), determinada para resistir à pressão interna e às cargas externas devidas ao peso de recobrimento, empuxos laterais e carga de trânsito.

Pressão de colapso admissível: 7,4 mca (Quadro 3.1-1).

As características do trecho considerado estão representadas na Figura 3.2-1. Os segmentos retilíneos correspondem a trechos onde são mínimas as variações de declividade.

a) Trechos entre as estacas 20 + 0,00 e 90 + 0,00

Na primeira hipótese, consideraremos a instalação de uma única ventosa no ponto mais alto (Estaca 20 + 0,00).

Se vier a ocorrer uma rutura total da tubulação no ponto mais baixo (Estaca 90 + 0,00), a pressão nesse ponto cairá instantaneamente a zero, abrindo-se a ventosa quando a onda de subpressão atingir o ponto mais alto (após um tempo da ordem de 1,5 seg).

A partir desse instante, as pressões nos dois extremos do trecho serão iguais à atmosférica e a linha piezométrica se transformará em uma reta unindo os dois pontos (Figura 3.2-2) teremos:

$$L = 1.400 \text{ m}$$

$$h_f = 250,00 - 215,30 = 34,70 \text{ m}$$

$$j = 0,02479 \text{ m/m}$$

$$\text{resultado: } Q_2 = 2,76 \text{ m}^3/\text{s}$$

No trecho de montante, a partir do reservatório, teremos:

$$L = 400,00 \text{ m}$$

$$h_f = 245,50 - 250,00 = 4,50 \text{ m}$$

$$j = 0,01125 \text{ m/m}$$

$$Q_2 = 1,85 \text{ m}^3/\text{s}$$

Assim, deverá ser instalada na estaca $20 + 0,00$, uma ventosa capaz de admitir a vazão de ar: $Q_3 = Q_2 - Q_1 = 0,91 \text{ m}^3/\text{s}$, que será obtida com uma ventosa de 100 mm (ver Quadro 3.1-2). Na eventualidade, porém de anular-se a vazão Q_1 , em razão do esvaziamento do reservatório ou do fechamento de sua válvula de saída, o ideal é que a ventosa seja capaz de admitir a vazão total $Q_2 = 2,76 \text{ m}^3/\text{s}$. Para isto, bastará instalar uma ventosa de 150 mm, que será capaz de admitir essa vazão para uma pressão negativa de 4,50 mca, aproximadamente, inferior à pressão de colapso admissível para a tubulação.

Solucionado assim, o problema de colapso no ponto alto, determinemos as pressões ao longo do trecho em estudo, pela diferença entre as cotas piezométricas e as cotas de eixo da tubulação, extraídos do perfil da linha. Os resultados são apresentados no Quadro 3.2-1, a seguir:

QUADRO 3.2-1

ESTACA	COTA PIEZOMÉTRICA (m)	COTA GEOM. (m)	PRESSÃO (mca)
20 + 0,00	250,00	250,00	0,00
30 + 0,00	245,04	248,04	- 3,00
40 + 0,00	240,08	246,07	- 5,99
42 + 10,00	238,84	245,58	- 6,74
44 + 0,00	238,11	245,29	- 7,18
44 + 15,00	237,74	245,14	- 7,40
47 + 10,00	236,37	244,60	- 8,23
52 + 10,00	233,89	243,62	- 9,73
57 + 10,00	231,41	241,05	- 9,64
62 + 0,00	228,93	238,48	- 9,55
72 + 10,00	223,97	233,34	- 9,37
74 + 19,00	222,76	232,08	- 9,32
77 + 10,00	221,50	229,24	- 7,74
78 + 2,00	221,20	228,57	- 7,27
80 + 0,00	220,26	226,45	- 6,19
82 + 10,00	219,02	223,67	- 4,65
85 + 0,00	217,78	220,88	- 3,10
90 + 0,00	215,30	215,30	- 0,00

Como a pressão de colapso máxima admissível para o tubo é de - 7,4 mca, observa-se que o mesmo não resistirá à subpressão causada pelo rompimento, entre as estacas 44 + 15,00 e 78 + 2,00, aproximadamente, o que corresponde a uma extensão de 667 metros, compreendendo todo o trecho entre os dois pontos de inflexão (estacas 52 + 10,00 a 74 + 19,00 = 449 metros), mais 155 metros a montante e 63 m a jusante. Em consequência, a tubulação no referido trecho deverá ser especificada para chapa 1/4", pressão de colapso admissível de 10,7 mca (Quadro 3.1-1).

Consideremos, agora, uma segunda hipótese, prevendo-se a instalação de outra ventosa de admissão de ar no ponto de inflexão correspondente ao subtrecho de maior declividade, isto é, na estaca 74 + 19,00.

Neste caso, após o rompimento da tubulação no ponto baixo (estaca 90 + 0,00) será estabelecido o equilíbrio pela abertura das duas ventosas instaladas, com a linha piezométrica representada por duas retas (Figura 3.2-3).

As vazões nos dois subtrechos serão as seguintes:

- Estaca 20 + 0,00 a 74 + 19,00

$$L = 1099 \text{ m}$$

$$h_f = 250,00 - 232,08 = 17,92 \text{ m}$$

$$j = 0,01631 \text{ m/m}$$

$$\text{resultando: } Q_2 = 2,24 \text{ m}^3/\text{s}$$

- Estaca 74 + 19,00 a 90 + 0,00

$$L = 301 \text{ m}$$

$$h_f = 232,08 - 215,30 = 16,78 \text{ m}$$

$$j = 0,05575 \text{ m/m}$$

$$\text{resultando: } Q_2 = 4,16 \text{ m}^3/\text{s}$$

Admitindo $Q_1 = 0$ para maior segurança, as vazões de admissão nas ventosas serão:

$$Q_4 = Q_2 = 2,24 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_5 = Q_3 - Q_2 = 1,92 \text{ m}^3/\text{s}$$

Para atender a essas vazões de admissão de ar, deverão ser instaladas 2 ventosas de 150 mm (Quadro 3.1-2).

O primeiro subtrecho (estaca 20 + 0,00 a 52 + 10,00) ainda ficará sujeito a pressões negativas, cujo valor máximo ocorrerá no ponto de inflexão da estaca 52 + 10,00:

$$\text{Cota piezométrica} = 239,40 \text{ m}$$

$$\text{Cota geométrica} = 243,62 \text{ m}$$

$$\text{Pressão} = - 4,22 \text{ m}$$

Sendo a pressão negativa máxima no trecho, inferior à pressão de colapso admissível para a tubulação (chapa 7/32"), não há necessidade de reforço na tubulação, a não ser que a composição das tensões devidas à subpressão e às cargas externas indique essa necessidade, o que deverá ser verificado especificamente. Em caso positivo, a solução mais econômica ainda poderá ser a instalação de uma terceira ventosa, na estaca 52 + 10,00, redimensionando-se as ventosas em função das vazões nos três subtrechos.

b) Trecho entre as estacas 90 + 0,00 e 123 + 15,00

Um rompimento no ponto mais baixo (estaca 90 + 0,00) acarretará um escoamento no sentido inverso, partindo do ponto mais alto a jusante (estaca 123 + 15,00).

Instalada uma ventosa no ponto mais alto, ela se abrirá quando a onda de subpressão atingir aquele ponto. A partir desse instante, a linha piezométrica do escoamento será uma reta ligando os pontos extremos (Figura 3.2-4).

$$\text{Teremos: } L = 675 \text{ m}$$

$$h_f = 229,40 - 215,30 = 14,10 \text{ m}$$

$$j = 0,02089 \text{ m/m}$$

resultando: $Q_2 = 2,54 \text{ m}^3/\text{s}$ - ventosa de 150 mm
instalada no ponto mais alto

A pressão negativa máxima no trecho ocorrerá no ponto de in flexão (estaca 102 + 5,00):

$$\text{Cota piezométrica} = 220,42 \text{ m}$$

$$\text{Cota geométrica} = 225,15 \text{ m}$$

$$\text{Pressão} = - 4,73 \text{ m}$$

Neste caso também a tubulação não precisa ser reforçada, a não ser que a solicitação conjugada das cargas externas o exigir.

c) Trecho entre as estacas 123 + 15,00 e 169 + 3,00

Este trecho deverá ser analisado para o caso de rompimento total no ponto baixo (estaca 169 - 3,00). A instalação de uma única ventosa no ponto alto (estaca 123 - 15,00) conduzirá aos seguintes resultados (Figura 3.2-5):

Teremos:

$$L = 908 \text{ m}$$

$$h_f = 229,40 - 203,25 = 26,15 \text{ m}$$

$$j = 0,02880 \text{ m/m}$$

$$\text{resultado: } Q_1 = 0, \quad Q_3 = Q_2 - Q_1 = 2,98 \text{ m}^3/\text{s} - \text{ven}$$

tosa de 150 mm

Calculando-se as pressões ao longo do trecho, teremos:

QUADRO 3.2-2

ESTACA	COTA PIEZOMÉTRICA (m)	COTA GEOM. (m)	PRESSÃO (mca)
123 + 15,00	229,40	229,40	0,00
130 + 0,00	225,80	229,04	- 3,24
135 + 0,00	222,92	228,75	- 5,83
138 + 0,00	221,19	228,57	- 7,38
140 + 0,00	220,04	228,45	- 8,41
142 + 10,00	218,60	226,29	- 7,69
143 + 15,00	217,88	225,21	- 7,38
145 + 10,00	216,88	223,69	- 6,81
150 + 0,00	214,29	219,80	- 5,51
169 + 3,00	203,25	203,25	0,00

No trecho de 115 metros, entre as estacas 138 + 0,00 e 143 + 15,00 a pressão negativa é superior à pressão de colapso admissível para a tubulação, devendo esta ser reforçada, utilizando-se chapa de 1/4".

Este reforço poderá ser dispensado instalando-se outra ventosa no ponto de inflexão (estaca 140 + 0,00), ficando o trecho subdividido em dois subtrechos (Figura 3.2-6).

- Estaca 123 + 15,00 a 140 + 0,00

$$L = 325,00 \text{ m}$$

$$h_f = 229,40 - 228,45 = 0,95 \text{ m}$$

$$j = 0,00292 \text{ m/m}$$

$$\text{resultando: } Q_2 = 0,93 \text{ m}^3/\text{s}$$

- Estaca 140 + 0,00 a 169 + 3,00

$$L = 583,00 \text{ m}$$

$$h_f = 228,45 - 203,25 = 25,20 \text{ m}$$

$$j = 0,04322 \text{ m/m}$$

$$\text{resultando: } Q_3 = 3,66 \text{ m}^3/\text{s}$$

Ventosas necessárias:

Estaca 123 + 15,00:

$$Q_4 = 0,93 \text{ m}^3/\text{s} - \text{ventosa de } 100 \text{ mm}$$

Estaca 140 + 0,00:

$$Q_5 = 3,66 - 0,93 = 2,73 \text{ m}^3/\text{s} - \text{ventosa de } 150 \text{ mm}$$

Observe-se, finalmente, que para o trecho anterior (Estaca 90 + 0,00 a 123 + 15,00), a ventosa calculada para este último ponto foi de 150 mm de diâmetro, que deverá ser então a escolhida.

3.3. Exemplo nº 2

Este exemplo corresponde a um trecho de adutora por gravidade, extensão de 1500 metros, em tubulação de aço, diâmetro 1100 mm, espessura de chapa 1/4" (6,35 mm), dimensionada para resistir à pressão interna e cargas externas correspondentes ao peso do recobrimento, empuxos laterais e carga de trânsito.

Pressão de colapso admissível = 4,3 mca (Quadro 3.1-1).

As características do trecho considerado estão representadas na Figura 3.3-1. Os segmentos retilíneos correspondem a trechos onde são mínimas as variações de declividade.

Ocorrendo um rompimento total no ponto baixo (Estaca 136 + 10,00), a depressão resultante atingirá rapidamente o ponto mais alto (Estaca 61 + 10,00), provocando a abertura da ventosa aí instalada.

A partir desse instante, a linha piezométrica corresponderá à reta unindo os extremos do trecho, resultando:

$$L = 1500,00 \text{ m}$$

$$h_f = 806,85 - 726,27 = 80,58 \text{ m}$$

$$j = 0,05372 \text{ m/m}$$

$$Q = 9,36 \text{ m}^3/\text{s}$$

Será necessário instalar duas ventosas de 200 mm, juntas, ou válvula de admissão de ar equivalente.

As pressões ao longo de todo o trecho serão negativas, calculadas no Quadro 3.3-1.

QUADRO 3.3-1

ESTACA	COTA PIEZOMÉTRICA (m)	COTA GEOM. (m)	PRESSÃO (mca)
61 + 10,00	806,86	806,85	0,00
66 + 15,00	801,21	805,51	- 4,30
69 + 10,00	798,25	804,83	- 6,58
71 + 10,00	796,64	804,45	- 7,81
74 + 0,00	793,42	801,81	- 8,39
81 + 0,00	785,90	795,64	- 9,74
91 + 0,00	775,15	786,83	- 11,68
101 + 0,00	764,40	778,02	- 13,62
108 + 0,00	756,89	771,85	- 14,96
114 + 0,00	750,44	764,35	- 13,91
119 + 0,00	745,07	758,10	- 13,03
124 + 0,00	739,70	751,85	- 12,15
128 + 0,00	735,40	743,66	- 8,26
132 + 2,00	730,99	735,27	- 4,27
134 + 0,00	728,96	731,39	- 2,43
136 + 10,00	726,27	726,27	0,00

Obs.: Nos trechos com pressões abaixo de -10,3 m.c.a. deve ocorrer separação de coluna por vaporização da água. Assim, as pressões abaixo desse valor acima anotadas, são meramente indicativas.

Comparando os valores da pressão na tabela acima com os do Quadro 3.1-1, verifica-se que há necessidade de reforçar a tubulação, empregando chapa de 5/16" (pressão de colapso admissível - 8,4 mca) em uma extensão de 227 metros, entre as Estacas 66 + 15,00 e 74 + 0,00 e entre as Estacas 128 + 0,00 e 132 + 2,00. Já entre as Estacas 74 + 0,00 e 128 + 0,00, com uma extensão de 1080 metros, a tubulação terá que ser executada em chapa de 3/8" (9,53 mm), cuja pressão de colapso admissível chega a 14,50 mca.

Observa-se, assim, que, de um total de 1500 m, apenas 193 m não necessitam chapa mais espessa.

Este problema poderá ser completamente sanado, se forem instaladas ventosas de admissão de ar em todos os pontos de variação sensível de declividade, isto é, nas Estacas 71 + 0,00, 108 + 0,00 e 124 + 0,00.

Ao abrirem-se todas as ventosas, o escoamento passará a ocorrer como indicado na Figura 3.3-2. As vazões nos diversos subtrechos serão:

- Estaca 61 + 10,00 a 71 + 0,00:

$$L = 190,00 \text{ m}$$

$$h_f = 806,85 - 804,45 = 2,40 \text{ m}$$

$$j = 0,01263 \text{ m/m}$$

$$\text{resultado: } Q_2 = 4,50 \text{ m}^3/\text{s}$$

- Estaca 71 + 0,00 a 108 + 0,00:

$$L = 740,00 \text{ m}$$

$$h_f = 804,45 - 771,85 = 32,60$$

$$j = 0,04405 \text{ m/m}$$

$$\text{resultado: } Q_3 = 8,47 \text{ m}^3/\text{s}$$

3.4. - Estaca 108 + 0,00 a 124 + 0,00:

$$L = 320,00 \text{ m}$$
$$h_f = 771,85 - 751,85 = 20,00 \text{ m}$$
$$j = 0,06250$$

resultado: $Q_4 = 10,10 \text{ m}^3/\text{s}$

- Estaca 124 + 0,00 a 136 + 10,00:

$$L = 250,00 \text{ m}$$
$$h_f = 751,85 - 726,27 = 25,58 \text{ m}$$
$$j = 0,10232$$

resultado: $Q_5 = 12,94 \text{ m}^3/\text{s}$

Considerando nula a vazão de montante (Q_1), para maior segurança, as vazões de ar a admitir e ventosas necessárias, dentro do limite de supressão de 4,3 mca, serão as seguintes (ver Quadro 3.1-2):

- Estaca 61 + 10,00: $Q_6 = Q_2 = 4,50 \text{ m}^3/\text{s};$

ventosa de 200 mm

- Estaca 71 + 0,00: $Q_7 = Q_3 - Q_2 = 3,97 \text{ m}^3/\text{s};$

ventosa de 200 mm

- Estaca 108 + 0,00: $Q_8 = Q_4 - Q_3 = 1,63 \text{ m}^3/\text{s};$

ventosa de 150 mm

- Estaca 124 + 0,00: $Q_9 = Q_5 - Q_4 = 2,85 \text{ m}^3/\text{s};$

ventosa de 200 mm

3.4. Exemplo nº 3

Neste exemplo será mostrado o caso bem mais comum da existência de válvula de descarga ao final de um trecho descendente de uma linha adutora, com declividade sensivelmente superior ao de trechos imediatamente a montante, também descendentes.

Quando for aberta a válvula de descarga e, principalmente, se a abertura for total, a tendência de maior fluxo no trecho inferior, de maior declividade, poderá provocar pressões negativas, principalmente nos pontos de inflexão e ainda mais a partir do instante em que a ventosa existente no ponto alto a montante começar a admitir ar na tubulação.

O exemplo refere-se a um trecho de adutora, diâmetro 1000 mm, extensão 1425 m, tubulação de aço, chapa 1/4" (6,35 mm). Na extremidade de jusante está instalada uma válvula de descarga, diâmetro 500 mm, na derivação de um tê de 1000 x 500 mm.

Pressão de colapso admissível na tubulação = 5,6 mca.

A linha piezométrica no trecho está representada na figura 3.4-1, obtida pelo seguinte dimensionamento:

- comprimento equivalente, no diâmetro 500 mm, das peças da derivação:

registro de descarga aberto	-	3 m
tê, saída lateral	-	<u>25 m</u>
Total		28 m

- comprimento equivalente total da linha para o diâmetro 1000 mm:

$$L = 1425 + 28 \left(\frac{1000}{500} \right)^5 = 2321 \text{ m}$$

$$h_f = 780,00 - 723,00 = 57,00 \text{ m}$$

$$j = 0,02456 \text{ m/m}$$

$$\text{resultando: } Q_2 = 4,92 \text{ m}^3/\text{s}$$

perda de carga no trecho: $1425 \times 0,02456 = 35,00 \text{ m}$

perda de carga nas peças da derivação = 22,00m

A ventosa a ser instalada no ponto alto (Estaca 32 + 10,00) será de 200 mm de diâmetro (ver Quadro 3.1-2).

Calculando-se as pressões ao longo do trecho, obtêm-se os valores do Quadro 3.4-1.

QUADRO 3.4-1

ESTACA	COTA PIEZOMÉTRICA (m)	COTA GEOM. (m)	PRESSÃO (mca)
32 + 10,00	780,00	780,00	0,00
38 + 0,00	777,30	779,32	- 2,02
44 + 0,00	774,36	778,57	- 4,21
47 + 15,00	772,51	778,11	- 5,60
50 + 0,00	771,41	777,83	- 6,42
55 + 0,00	768,95	777,21	- 8,26
59 + 10,00	766,74	776,45	- 8,91
62 + 10,00	765,22	773,01	- 7,74
65 + 10,00	763,79	769,38	- 5,59
67 + 10,00	762,81	766,95	- 4,14
70 + 0,00	761,58	763,92	- 2,34
75 + 0,00	759,13	757,86	+ 1,27
80 + 0,00	756,67	751,80	+ 4,87
90 + 0,00	751,76	739,67	+ 12,09
103 + 15,00	745,00	723,00	+ 22,00

Observa-se que o trecho de 355 m entre as Estacas 47 + 15,00 e 65 + 10,00 ficará sob pressão negativa superior à pressão de colapso, havendo necessidade de, nesse trecho, utilizar tubulação com chapa de 5/16".

Deve-se ressaltar que, se a linha for suficientemente ascendente

a jusante da válvula, esse trecho também contribuirá para a descarga, o que modificará o dimensionamento acima apresentado.

Consideremos para a alternativa de se instalar outra ventosa, no ponto de inflexão (Estaca 59 + 10,00). O sistema passará a funcionar como mostrado na Figura 3.4-2, dividido em dois subtrechos.

- 1º subtrecho (Estaca 32 + 10,00 a 59 + 10,00)

$$L = 540,00 \text{ m}$$

$$h_f = 780,00 - 776,65 = 3,35 \text{ m}$$

$$j = 0,00620 \text{ m/m}$$

$$\text{resultando: } Q_2 = 2,45 \text{ m}^3/\text{s}$$

- 2º subtrecho (Estaca 59 + 10,00 a 103 + 15,00)

$$L = \text{equivalente} = 885 + 896 = 1781,00 \text{ m}$$

$$h_f = 776,35 - 723,00 = 53,35 \text{ m}$$

$$j = 0,02996 \text{ m/m}$$

$$\text{resultando: } Q_3 = 5,42 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\text{perda de carga no trecho: } 0,02996 \times 885 = 26,51 \text{ m}$$

$$\text{perda de carga nas peças de derivação} = 26,84 \text{ m}$$

Serão necessárias duas ventosas:

$$\text{- Estaca } 32 + 10,00: Q_4 = Q_2 - Q_1 = 2,45 \text{ m}^3/\text{s}, \text{ admitindo-}$$

-se $Q_1 = 0$, para maior segurança. Corresponde a uma ventosa de 150 mm.

$$\text{- Estaca } 59 + 10,00: Q_5 = Q_3 - Q_2 = 2,97 \text{ m}^3/\text{s}$$

ventosa de 150 mm

FIGURA 3.2-1

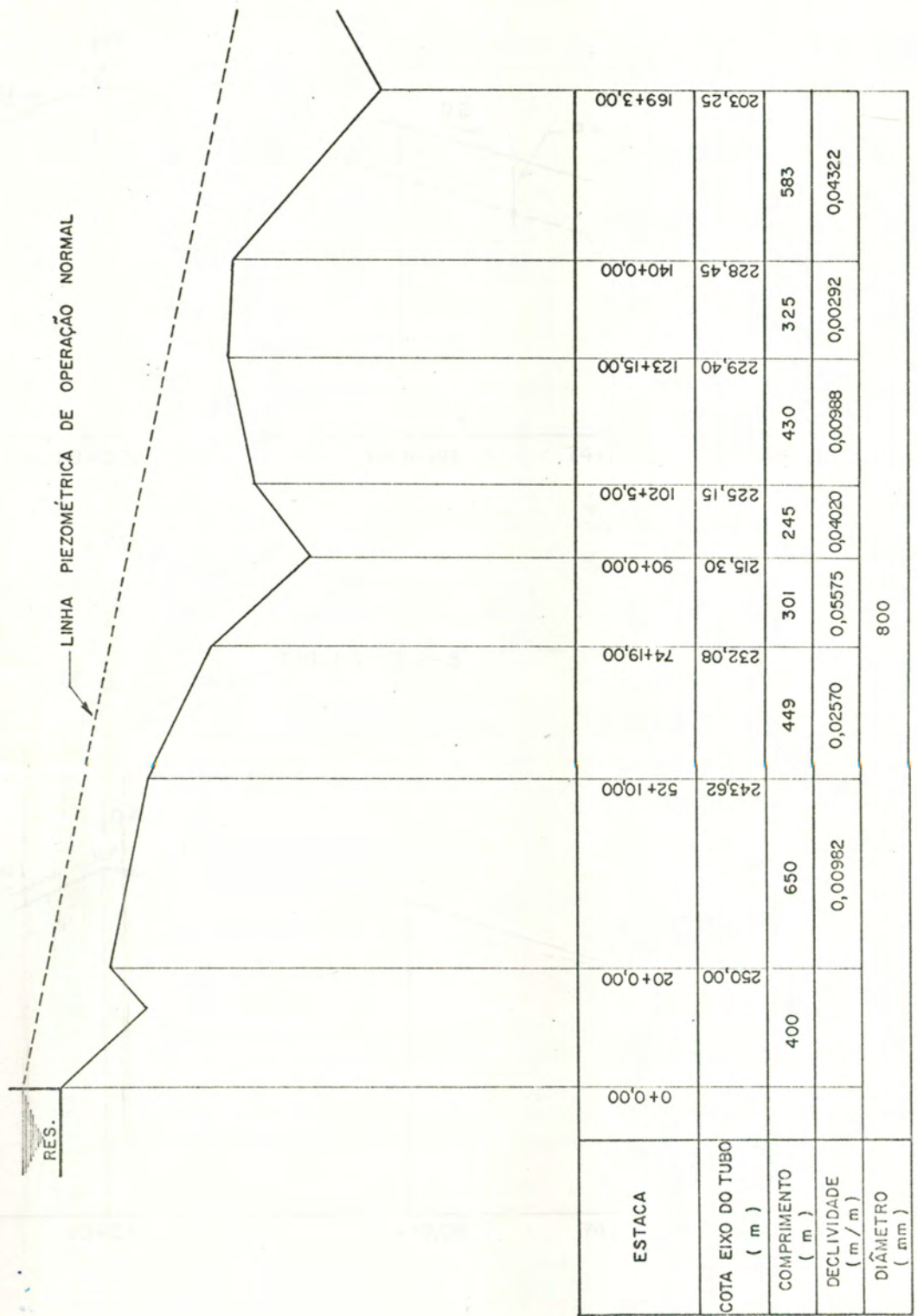


FIGURA 3.2-2

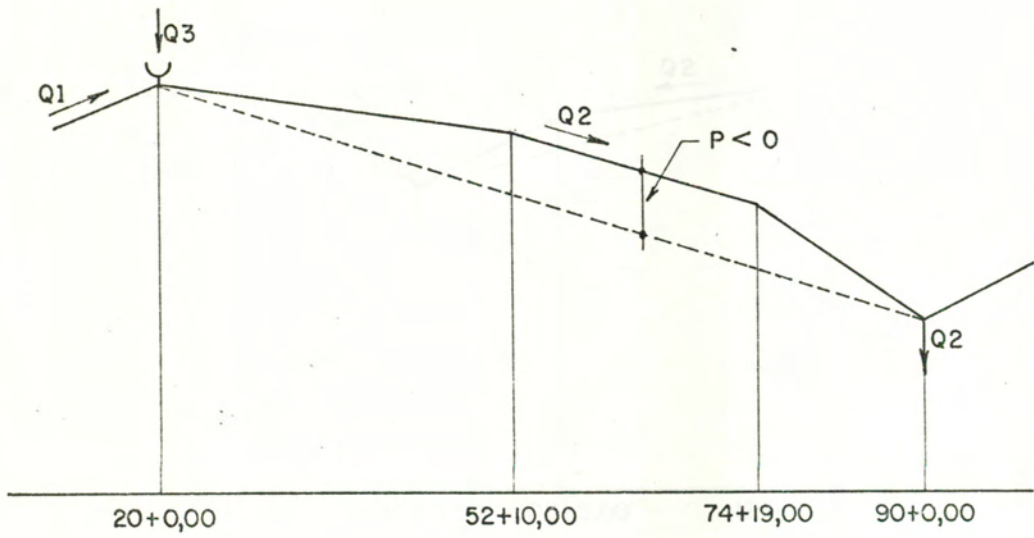


FIGURA 3.2-3

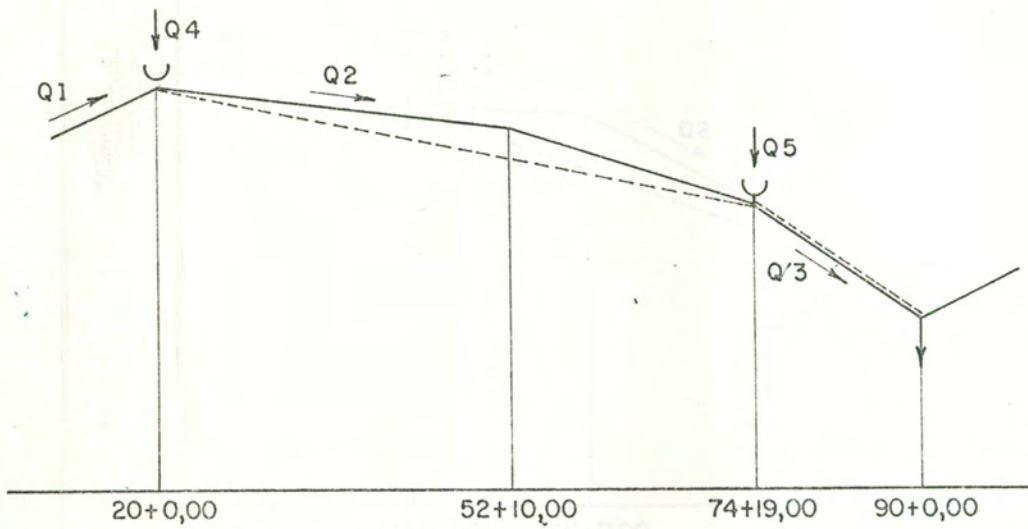


FIGURA 3.2-4

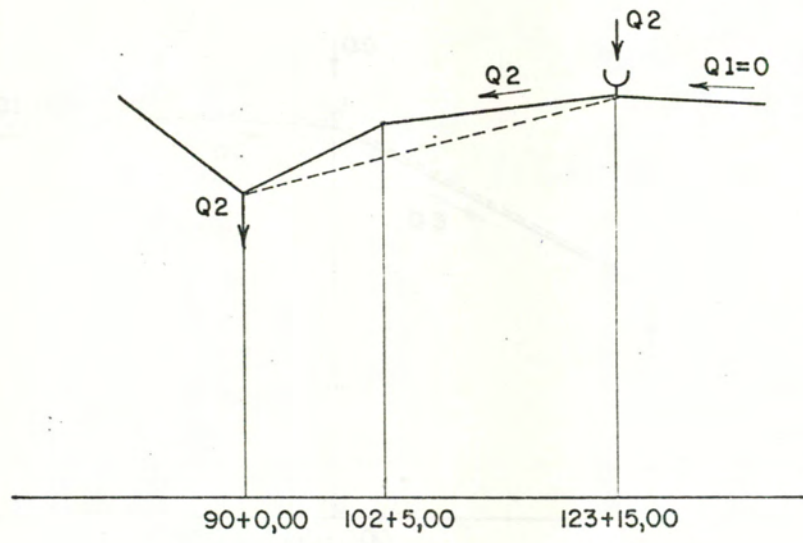


FIGURA 3.2-5

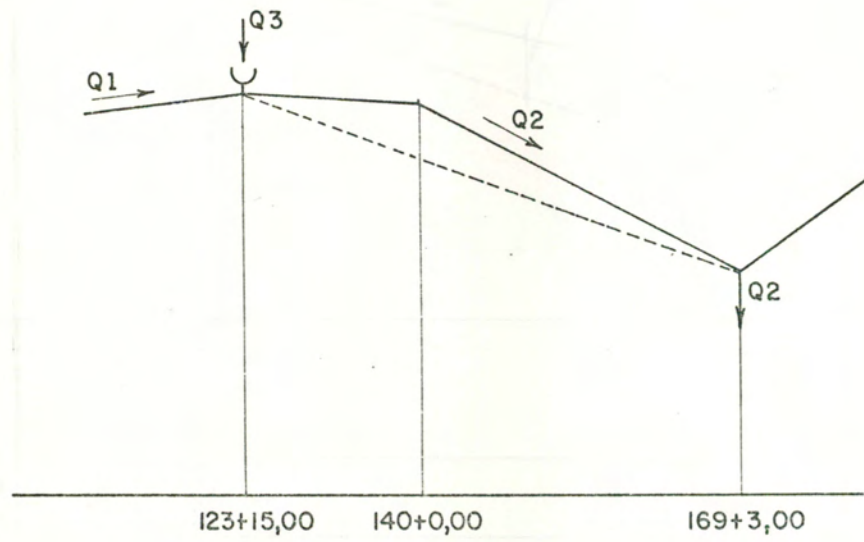


FIGURA 3.2-6

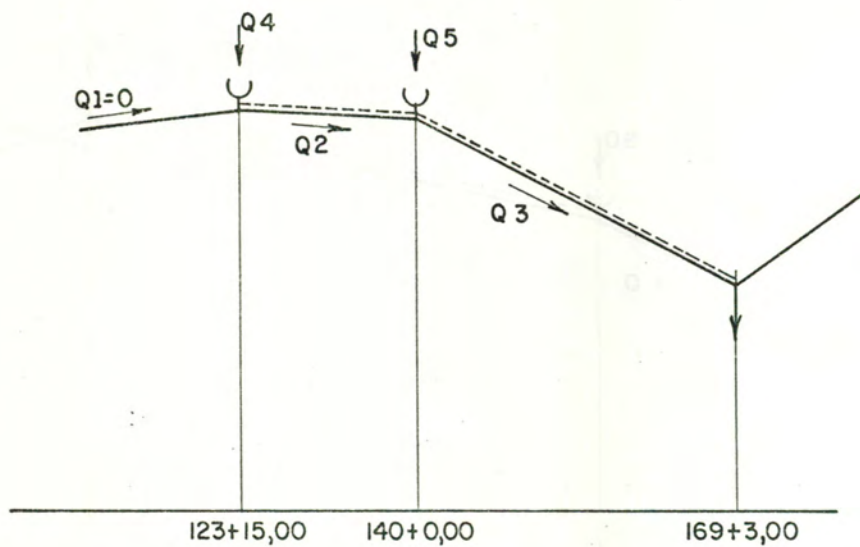


FIGURA 3.3-1

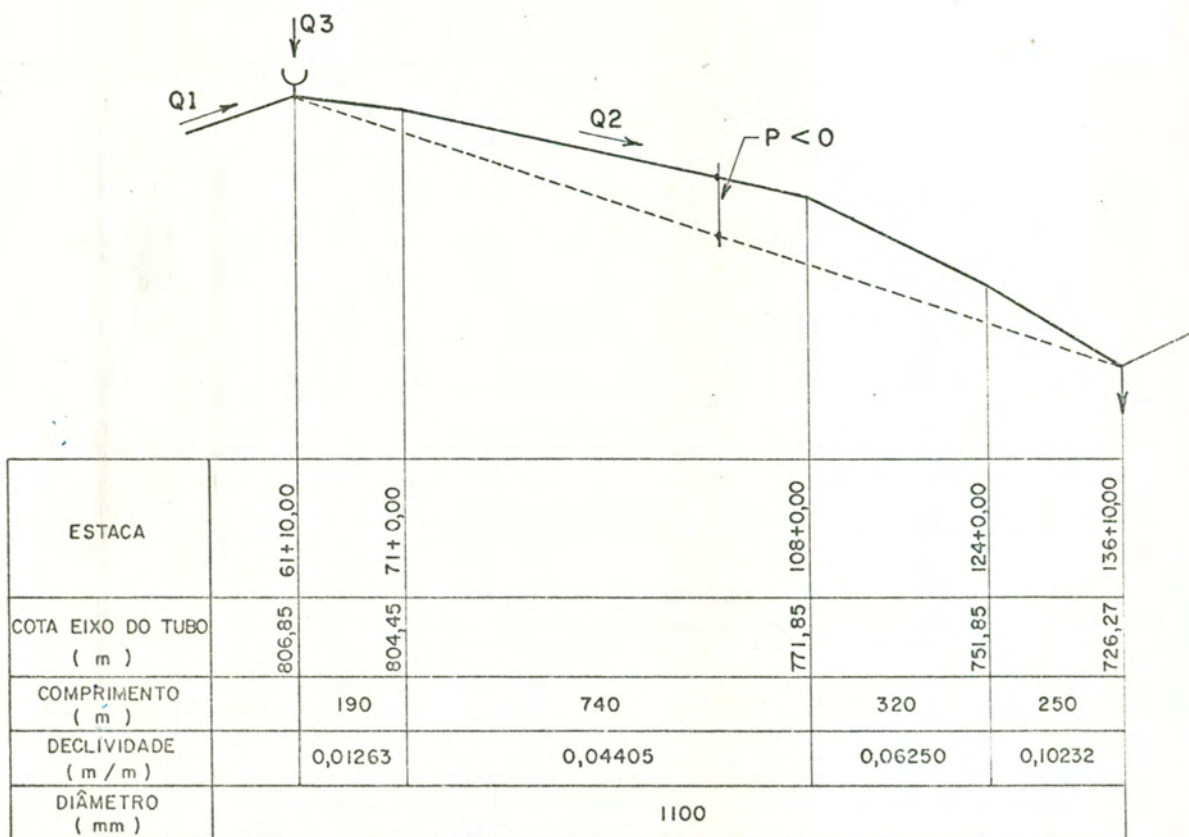


FIGURA 3.3-2

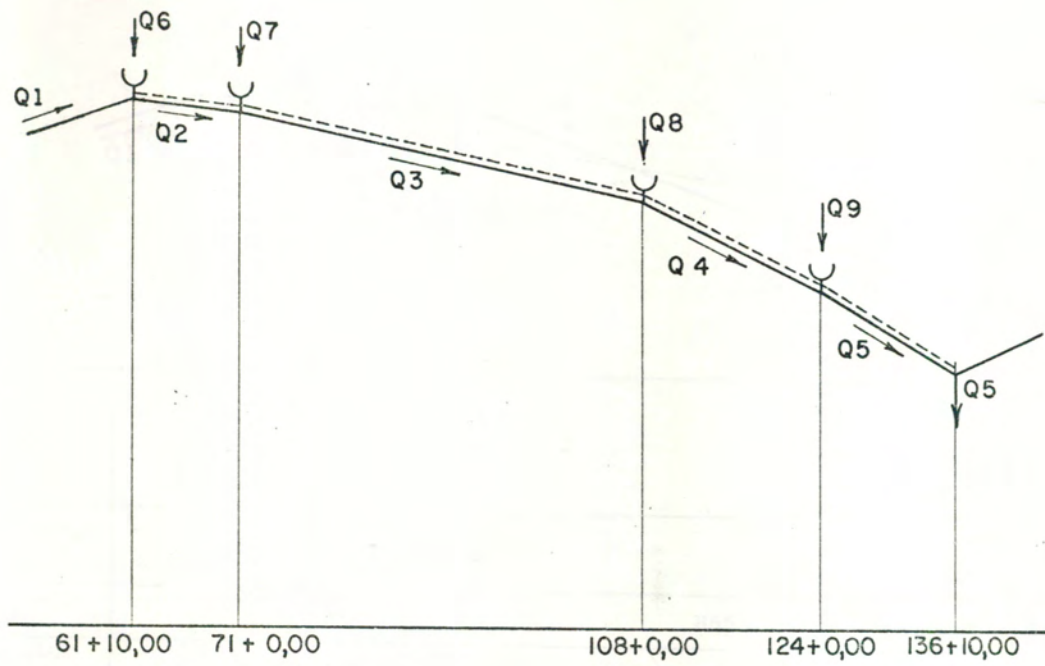


FIGURA 3.4-1

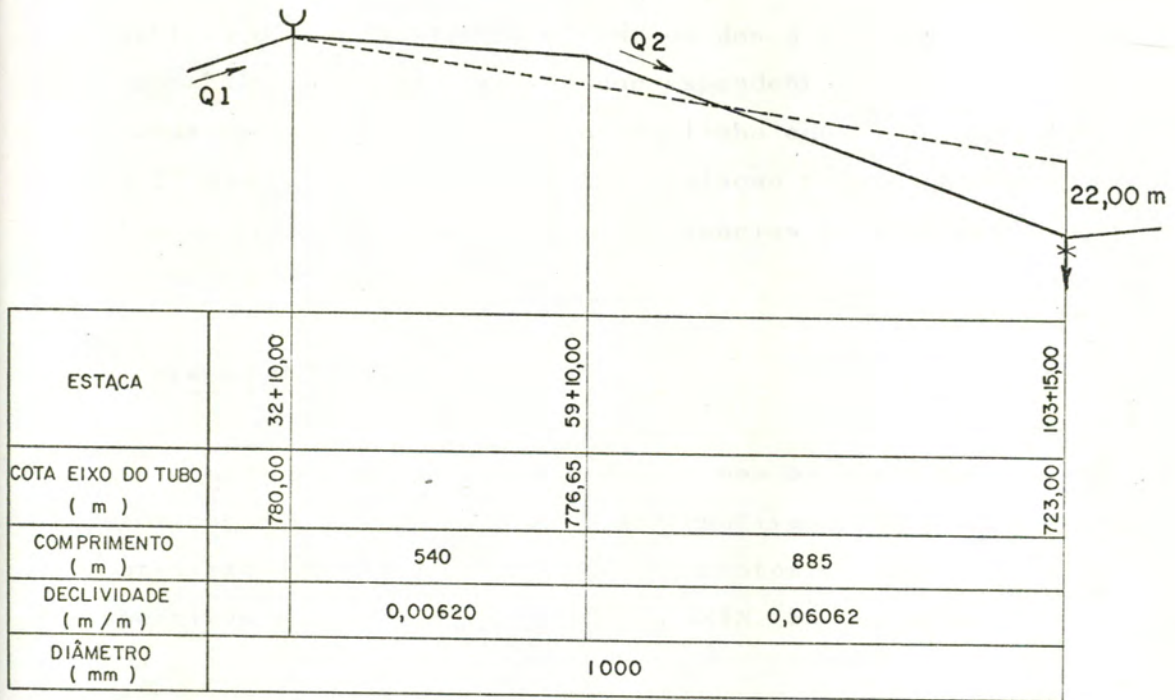
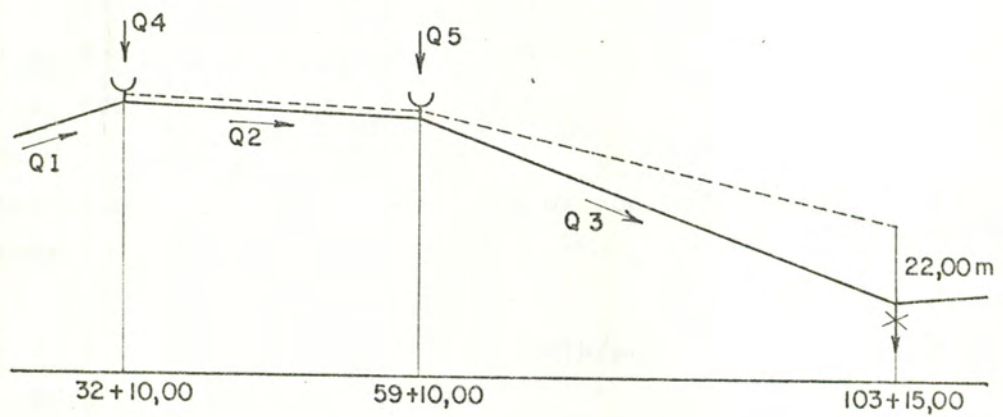


FIGURA 3.4-2



4. COMPARAÇÃO ECONÔMICA

Neste item será apresentada a comparação econômica entre as alternativas dimensionadas para cada um dos 3 exemplos, designando-se por "Alternativa 1" aquela correspondente à instalação de ventosas apenas nos pontos altos da linha adutora e por "Alternativa 2" aquela correspondente à instalação também de ventosas nos pontos de inflexão, verificadas necessárias para se evitar o reforço da tubulação.

4.1. Preços Unitários

Nesta comparação serão considerados apenas os itens de materiais e serviços diferentes para as 2 alternativas. Os preços unitários utilizados foram extraídos de orçamentos elaborados para os respectivos projetos e expressos em ORTN. São os seguintes:

- a) Fornecimento e montagem de tubos de aço, inclusive revestimento interno e externo:

- Ø 1100 mm, ch. 1/4":	22,880	ORTN/m
- Ø 1100 mm, ch. 5/16":	28,242	"
- Ø 1100 mm, ch. 3/8":	33,644	"
- Ø 1000 mm, ch. 1/4":	20,833	"
- Ø 1000 mm, ch. 5/16":	25,663	"
- Ø 800 mm, ch. 7/32":	14,612	"
- Ø 800 mm, ch. 1/4":	16,658	"

- b) Execução de derivações em tubos de aço, com flange, para instalação de ventosas:

- Ø 1100 x 150/200:	10,560	ORTN/unid.
- Ø 1000 x 150/200:	9,619	"
- Ø 800 x 150/200:	8,063	"

c) Fornecimento e montagem de ventosas, classe 150:

- Ø 150 mm: 109,447 ORTN/unid.
- Ø 200 mm: 182,834 "

d) Fornecimento e montagem de registro RFFV:

- Ø 150 mm: 39,293 ORTN/unid.
- Ø 200 mm: 60,044 "

e) Execução de caixa para ventosa:

- ventosa única: 87,590 ORTN/unid.
- ventosa dupla: 135,314 "

4.2. Resultados

Os resultados obtidos são os seguintes:

a) Exemplo nº 1:

- Alternativa 1 (2983 m de tubos de aço, Ø 800 mm, sendo 782 m em chapa 1/4" e 2201 m em chapa 7/32", 2 ventosas de 150 mm, inclusive derivações, registros RFFV e caixas de proteção).

. Preço global: 45.676,36 ORTN

- Alternativa 2 (2983 m de tubos de aço, Ø 800 mm, chapa 7/32/ e 4 ventosas de 150 mm, inclusive derivações, registros e caixas).

. Preço global: 44.565,17 ORTN

Diferença de preço favorável à Alternativa 2: 2,4%, correspondente a Cr\$ 51.005.743 (julho/85).

b) Exemplo nº 2:

- Alternativa 1 (1500 m de tubos de aço, Ø 1100 mm, sendo 193 m em ch. 1/4", 227 m em chapa 5/16" e 1080 m em ch. 3/8", 2 ventosas de 200 mm montadas juntas, inclusive derivações, registros e caixas).

. Preço global: 47.804,48 ORTN

- Alternativa 2 (1500 m de tubos de aço, Ø 1100 mm, ch. 1/4"; 2 ventosas de 200 mm e 2 de 150 mm, respectivas derivações, registros e caixas).

. Preço global: 35.480,52 ORTN

Diferença de preço favorável à Alternativa 2: 25,8%, correspondendo a Cr\$ 565.693.300 (julho/85).

c) Exemplo nº 3:

- Alternativa 1 (1425 m de tubos de aço, Ø 1000 mm, sendo 355 m em ch. 5/16" e 1070 m, em ch. 1/4"; 1 ventosa de 200 mm, inclusive derivação, registro e caixa).

. Preço global: 31.795,26 ORTN

- Alternativa 2 (1425 m de tubos de aço, Ø 1000 mm, ch. 1/4"; 2 ventosas de 150 mm, respectivas derivações, registros e caixas).

. Preço global: 30.178,53 ORTN

Diferença a favor da Alternativa 2: 4,9%, correspondendo a Cr\$ 74.210.905 (julho/85).

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Das situações apresentadas neste trabalho e que podem ser causas de aparecimento de elevadas pressões negativas em linhas adutoras de água, vale ressaltar:

- a hipótese de abertura total de válvula de descarga, para esvaziamento de trecho da linha, é de probabilidade muito elevada, justamente pelo interesse da operação de deixar a linha fora de carga para qualquer manutenção, o menor espaço de tempo possível;
- a hipótese de rompimento total em pontos baixos, de pouca probabilidade em trechos enterrados, passa a ser de risco considerável nos casos de trechos aéreos, principalmente em travessias de rios, córregos ou talvegues;
- o fechamento da válvula de saída do reservatório de montante, agravante do problema, é providência obrigatória quando da necessidade de esvaziamento de trecho da linha e automática quando ocorre rompimento, visando minimizar o desperdício de água.

Em face dessas observações e dos resultados verificados nos exemplos apresentados, julga-se recomendável que, nos projetos de linhas adutoras de água, seja obrigatoriamente verificada a conveniência de instalação de ventosas ou aparelhos similares de admissão de ar em pontos de inflexão, cujo trecho inferior tenha declividade maior que o superior, principalmente para o caso de tubos de paredes finas, mais sujeitos a colapsos, por efeito de pressões negativas.

Tal verificação não só pode trazer razoável economia na obra, como, certamente, dará maior segurança e confiabilidade.

6. BIBLIOGRAFIA

- AWWA Manual M-11 - Steel Pipe - Design and Instalation (1964)
- Locating and Sizing Air - Release Valves, Joseph E. Lescovich - AWWA Journal, jul 72
- Fernández, Miguel/Lasmar, Ibrahim/Accioli, Affonso/
Graél, Marcus - Projeto do Sistema de Distribuição de
Água de Goiânia - SANEAGO - 1984/85