



## **I-207 - MODELAGEM COMPUTACIONAL DE VENTOSAS AUTOMÁTICA DE DUPLO EFEITO COM ABERTURA E FECHAMENTO NÃO INSTANTÂNEOS COMO MECANISMO DE ALÍVIO DO GOLPE DE ARÍETE**

**Marcus V. S. Rodrigues**<sup>(1)</sup>

Engenheiro Mecânico pela Universidade Federal do Ceará. Mestre em Engenharia Civil com área de concentração em Recursos Hídricos pela Universidade Federal do Ceará. Doutorando em Engenharia Civil com área de concentração em Recursos Hídricos pela Universidade Federal do Ceará.

**Fernando Peroba Júnior**<sup>(2)</sup>

Engenheiro Civil pela Universidade Federal do Ceará. Mestre em Engenharia Civil com área de concentração em Recursos Hídricos pela Universidade Federal do Ceará. Engenheiro Civil da Advocacia Geral da União.

**Gustavo Paiva Weyne Rodrigues**<sup>(3)</sup>

Engenheiro Civil pela Universidade Federal do Ceará. Mestre em Engenharia Civil com área de concentração em Saneamento Ambiental pela Universidade Federal do Ceará. Doutorando em Engenharia Civil com área de concentração em Saneamento Ambiental pela Universidade Federal do Ceará.

**Marco Aurélio H. de Castro**<sup>(4)</sup>

Engenheiro Civil, PhD., Drexel University -USA. Professor Adjunto, Departamento de Engenharia. Hidráulica e Ambiental da Universidade Federal do Ceará.

**Endereço**<sup>(1)</sup>: Rua Luciano Magalhães, 333 - Fátima - Fortaleza - CE - CEP: 60415-150 - Brasil - Tel: (85) 3366-9589 - e-mail: marcusufc@hotmail.com

### **RESUMO**

Durante fenômenos transitórios podem ocorrer pressões muito baixas nos trechos mais elevados de uma tubulação, ocorrendo o acúmulo de ar que é arrastado pela água ocasionando sérios danos à tubulação. A presença de uma grande quantidade de ar na tubulação de um sistema de adução de água por recalque é a causa direta de redução da seção e como consequência tem-se a redução da capacidade de transporte, comprometendo seriamente o rendimento deste sistema. Os dispositivos mais modernos para o alívio do golpe de aríete trabalham com ar, dentre eles, os mais utilizados na prática são as ventosas automáticas, foco deste trabalho. A condição de contorno destas ventosas é bem complexa, resultando em uma equação não linear, além do fato de a área do orifício da ventosa variar linearmente com o tempo. Para resolver esta não linearidade aplicou-se o método da aproximação parabólica nos intervalos onde ocorre escoamento do ar em regime subsônico. Neste trabalho foram feitas simulações do transiente hidráulico para verificar a eficiência das ventosas automáticas de duplo efeito com abertura e fechamento não instantâneos como um mecanismo de alívio do golpe de aríete. As simulações foram feitas utilizando o software UFC6 criado no Laboratório de Hidráulica Computacional (LAHC) da Universidade Federal do Ceará. As válvulas ventosas representam uma solução hidráulica satisfatória, pois, são equipamentos de fácil instalação e manutenção, além do fato de serem bem mais compensadores do ponto de vista econômico. Os resultados obtidos demonstraram a eficiência deste mecanismo como alívio do golpe de aríete.

**PALAVRAS-CHAVE:** Hidráulica Transiente, Ventosa, Alívio do Golpe de Aríete.

### **INTRODUÇÃO**

Os sistemas hidráulicos (por exemplo, um sistema para recalque de água) podem sofrer alterações nas condições de escoamento caracterizadas pela variação da pressão e da velocidade do fluido com o tempo, gerando regimes variados. Esses escoamentos em regimes variados são chamados de *escoamentos transientes* ou *transitórios hidráulicos*, e são caracterizados por ocorrerem entre dois regimes de escoamentos permanentes.

Qualquer alteração no movimento ou uma paralisação de um elemento do sistema dará origem aos fenômenos transitórios. Então, logo após a ocorrência de uma perturbação, como a parada instantânea da bomba, o regime permanente presente antes é alterado, dando origem a um regime variado que posteriormente passará a um novo estado permanente.



As variações de pressão ao longo da tubulação podem ocorrer de maneira muito brusca, ocasionando ruídos semelhantes a golpes de martelo, daí este fenômeno ser conhecido comumente como *golpe de aríete*.

Durante fenômenos transitórios podem ocorrer pressões muito baixas nos trechos mais elevados da tubulação, ocorrendo o acúmulo de ar que é arrastado pela água ocasionando sérios danos na tubulação.

A presença de uma grande quantidade de ar na tubulação de um sistema de adução de água por recalque é a causa direta para a redução da seção e como consequência tem-se a redução da capacidade de transporte, comprometendo seriamente o rendimento deste sistema.

Este excesso de ar, também, pode ocasionar a elevação do consumo por sobrecarga da bomba ou uma redução da vazão, e também, pode gerar erros nos manômetros e nos elementos de medição do sistema.

No caso da adução por gravidade, o ar depositado nos pontos altos da tubulação, geralmente os pontos onde ocorre a queda de pressão, acarreta um aumento da perda de carga e, conseqüentemente, uma redução da vazão de água.

Para um bom funcionamento e estabilidade de um sistema de adução, deve-se prever a entrada de ar, pois, quando se esvazia uma tubulação, o ar deve entrar com o mesmo gradiente com o qual a água sai, de forma que a diferença de pressão entre o meio e o interior da tubulação permaneça dentro dos limites pré-estabelecidos, evitando o colapso por contração devidos as sub-pressões.

Então, para um perfeito funcionamento de um sistema de adução de água, devem-se instalar dispositivos que expulsem o ar acumulado e que admitam ar para evitar as contrações causadas pelas sub-pressões.

Os dispositivos mais modernos para o alívio do golpe de aríete trabalham com ar, os mais utilizados na prática são as ventosas automáticas, parte integrante deste trabalho. Devido ao fato de estes dispositivos trabalharem com ar, os mesmos possuem uma modelagem matemática bastante complexa.

## VENTOSAS

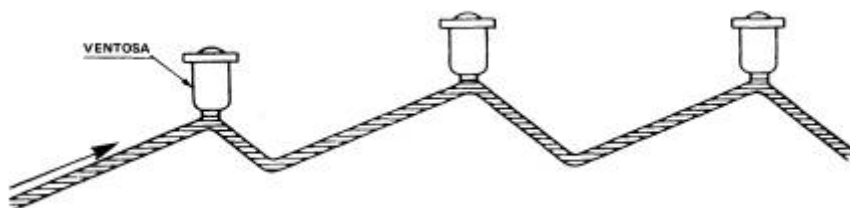
As ventosas são dispositivos hidromecânicos instalados em condutos forçados que permitem a entrada de ar quando ocorre redução de pressão em pontos altos da adutora, bem como, durante o esvaziamento da mesma por ocasião de manutenção. Também, permitem a saída do ar que tenha ficado ou entrado na adutora por gravidade ou em tubulações de recalque, principalmente se a tubulação formar algum traçado tipo sifão.

As ventosas, em geral, são instaladas nas partes mais altas dos sifões, após um longo trecho horizontal ou em trechos com pequenas declividades.

Para se atingir um máximo de eficiência no funcionamento de uma ventosa, torna-se necessário que sua instalação seja feita nos aclives suaves da adutora e que os declives após a ventosa sejam acentuados (ver Figura 1), de modo a acumular melhor o ar nos pontos altos e possibilitar sua expulsão com maior facilidade.

A tendência do acúmulo de ar nos pontos pode comprometer o rendimento de um escoamento, pois, com esse acúmulo ocorre a redução da seção útil do conduto e conseqüentemente o aumento da perda de carga.

Figura 1: Traçado recomendável



**Figura 2: Traçado não recomendável**

Na instalação desses mecanismos de alívio do golpe de aríete, devem-se evitar traçados de adutoras em que se tenha um aclave acentuado antes e um declive leve após a ventosa (ver Figura 2).

Há casos de golpe de aríete provocados por bolsas de ar presentes nas tubulações. Durante o fenômeno transiente podem ocorrer pressões bastante baixas nos pontos mais altos da linha de uma adutora. Estes pontos podem ser protegidos com a instalação de válvulas de admissão e/ou expulsão de ar.

Há diversos tipos de ventosas, das mais simples as mais complexas, são munidas de roscas ou flange, dependendo do modo como são suas instalações na tubulação; as de flange necessitam do emprego de um tê no ponto alto do conduto.

As ventosas automáticas de duplo efeito são, também, conhecidas como ventosas de *tríplice função*. Elas são projetadas para admitir ar nos casos onde a pressão cai abaixo da pressão atmosférica e para expulsar o ar que é arrastado pela água e se concentra nos pontos elevados das tubulações.

As *ventosas automáticas de duplo efeito* são constituídas por um corpo dividido em dois compartimentos - o principal e o auxiliar - contendo cada um, em seu interior, um flutuador esférico ou cilíndrico. Os flutuadores de aço inoxidável permitem o seu funcionamento em altas pressões sem que haja colapso. O funcionamento do flutuador é facilitado por meio de guias de seção circular.

**Figura 3: Ventosa Automática de Duplo Efeito (Fonte: Regaber, 2006)**

As ventosas automáticas de duplo efeito têm por finalidade específica:

- Expelir adequadamente o ar deslocado pela água durante o enchimento de uma adutora;
- Admitir quantidade suficiente de ar, durante o esvaziamento de uma adutora, a fim de evitar a formação de sifões, e manter a pressão de esvaziamento dentro dos limites;
- Expelir automaticamente o ar que venha a formar-se com a adutora já em operação.

As *ventosas automáticas de simples efeito* trabalham de forma unilateral, ou expulsando o ar acumulado na tubulação, ou na admissão de ar evitando a contração da tubulação causada por pressões negativas.

Quando há acúmulo de ar nos pontos elevados da adutora é pressionado o orifício da válvula que se abre quando atingir certo limite de projeto, permitindo, então, a expulsão do ar acumulado. Estas ventosas apresentam dispositivos de vedação que impedem a admissão de ar na adutora.

**Figura 4: Ventosa Automática de Simples Efeito (Fonte: Regaber, 2006)**



As ventosas automáticas de fechamento lento apresentam as mesmas características das ventosas de duplo efeito. A diferença ocorre quando o ar aprisionado é totalmente expulso e o orifício da ventosa continua aberto, possibilitando a passagem de água.

As ventosas automáticas de fechamento lento são sistemas desenvolvidos para a proteção da adutora de um colapso resultante do vácuo interno e do golpe de aríete. Elas são dimensionadas para que a abertura seja feita de forma rápida quando o gradiente hidráulico torna-se abaixo da cota de onde a ventosa é instalada, admitem uma quantidade de ar suficiente para se evitar o vácuo na tubulação.

Quando a linha piezométrica volta a subir, ultrapassando a cota de instalação da ventosa, o orifício fecha de forma lenta. Este fechamento deve ocorrer com a velocidade controlada por efeito de um amortecedor hidráulico. Fator este que é bastante importante, pois, não há introdução de transientes na linha quando o fechamento é de forma lenta.

**Figura 5: Ventosa Automática de Fechamento Lento (Fonte: Regaber, 2006)**



## METODOLOGIA

Segundo Lessa (1984) podem ser feitas algumas hipóteses simplificadoras. O fluxo de ar através da ventosa é isentrópico e as expansões e contrações do ar dentro da tubulação ocorrem à temperatura constante. Assume-se que o volume de ar admitido permanece nas vizinhanças da válvula, sendo este volume pequeno quando comparado com o volume do líquido entre as seções.

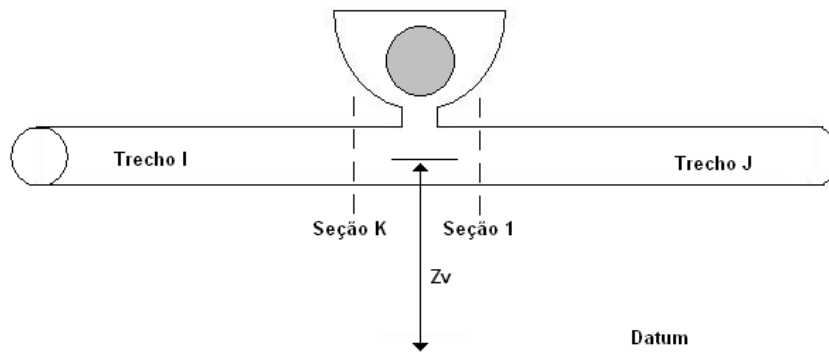


A equação que governa a lei isotérmica dos gases é:

$$pV = m\bar{R}T \quad (1)$$

Onde  $p$  é a pressão absoluta dentro da tubulação;  $V$  é o volume de ar,  $m$  é a massa de ar;  $\bar{R}$  é a constante dos gases, que para o ar  $\bar{R} = 287 \text{ J/kgK}$  e  $T$  é a temperatura absoluta.

**Figura 6: Notação para ventosa**



Desprezando as perdas de cara na junção, tem-se:

$$H_p(I, K) = H_p(J, 1) \quad (2)$$

Estando a ventosa fechada, tem-se:

$$Q_p(I, K) = Q_p(J, 1) \quad (3)$$

Quando a carga piezométrica cai abaixo da cota  $Z_v$  a válvula se abre, possibilitando a entrada de ar. Quando a carga volta a subir ultrapassando  $Z_v$ , então o ar é expulso da tubulação.

Durante o funcionamento da ventosa tem-se que a equação da continuidade em termos do volume é escrita da seguinte forma:

$$V_{Par} = V_{ar} + 0,5\Delta t [Q_p(J, 1) + Q(J, 1) - Q_p(I, K) - Q(I, K)] \quad (4)$$

Onde  $V_{Par}$  é o volume de ar na tubulação no final do intervalo de tempo;  $V_{ar}$  é o volume de ar na tubulação no início do intervalo de tempo;  $Q(J, 1)$  e  $Q_p(J, 1)$  são as vazões de água na seção 1 do trecho J no início e no final do intervalo de tempo, respectivamente;  $Q(I, K)$  e  $Q_p(I, K)$  são as vazões de água na seção K do trecho I no início e no final do intervalo de tempo, respectivamente.

As equações características são válidas e podem ser expressas por comodidade computacional das seguintes formas:

$$C^+ : Q_p(I, K) = C_p - C_a H_p(I, K) \quad (5)$$

$$C^- : Q_p(J, 1) = C_N + C_a H_p(J, 1) \quad (6)$$

Em que:

$$C_p = Q(I, K) + C_a H(I, K) - R\Delta t Q(I, K) | Q(I, K) | \quad (7)$$



$$C_N = Q(J, 1) - C_a H(J, 1) - R \Delta t Q(J, 1) | Q(J, 1) | \quad (8)$$

Onde  $C_a = \frac{gA}{a}$  e  $R = \frac{f}{2DA}$ .

Como  $H_P(I, K) = H_P(J, 1)$ , equação (2), então, substituindo as equações (5) e (6) na equação (4), e simplificando o resultado, obtém-se:

$$V_{Par} = \bar{D} + \bar{E} H_P(I, K) \quad (9)$$

Onde:

$$\bar{D} = V_{ar} + 0,5 \Delta t [C_N - C_P + Q(J, 1) - Q(I, K)] \quad (10)$$

$$\bar{E} = C_a \Delta t \quad (11)$$

Para pequenos intervalos de tempo:

$$m = m_0 + 0,5 (\dot{m}_0 + \dot{m}) \Delta t \quad (12)$$

Onde  $m_0$  é a massa de ar no início do intervalo de tempo;  $\dot{m}_0$  é a vazão mássica no início do intervalo de tempo;  $\dot{m}$  é a vazão mássica no final do intervalo de tempo.

Substituindo as equações (9) e (12) na hipótese inicial, ou seja, na equação (1), tem-se:

$$p [\bar{D} + \bar{E} H_P(I, K)] = [m_0 + 0,5 \Delta t (\dot{m}_0 + \dot{m})] \bar{R} T \quad (13)$$

Onde  $p$  é a pressão do ar na ventosa.

A pressão absoluta  $p$  é relacionada com  $H_P(I, K)$  através da equação:

$$p = \gamma [H_P(I, K) - \bar{F}] \quad (14)$$

Sendo

$$\bar{F} = Z_V - H_{BV} \quad (15)$$

E  $\gamma$  é o peso específico do líquido dentro do tubo;  $H_{BV}$  é a carga barométrica no local da ventosa.

Da equação (14), pode-se deduzir que:

$$H_P(I, K) = \frac{p}{\gamma} + \bar{F} \quad (16)$$

Substituindo a equação (16) na equação (13) e agrupando os termos, obtém-se:

$$p \left[ \bar{D} + \bar{E} \left( \frac{p}{\gamma} + \bar{F} \right) \right] = [m_0 + 0,5 \Delta t (\dot{m}_0 + \dot{m})] \bar{R} T \quad (17)$$

ou



$$p \left[ \bar{E} \frac{p}{\gamma} + \bar{D} + \bar{E}\bar{F} \right] = \bar{H} + \bar{G}\dot{m} \quad (18)$$

Onde

$$\bar{G} = 0,5 \Delta t \bar{R}T \quad (19)$$

$$\bar{H} = m_0 \bar{R}T + \bar{G}\dot{m}_0 \quad (20)$$

A equação (18) pode ser escrita em função do quociente  $p' = p/p_0$  como segue:

$$p'(\bar{p}' + \bar{X}) = \bar{Y} + \bar{Z}\dot{m} \quad (21)$$

Onde as constantes  $\bar{X}$ ,  $\bar{Y}$  e  $\bar{Z}$  são dadas por:

$$\bar{X} = \frac{(\bar{D} + \bar{E}\bar{F})\gamma}{\bar{E}p_0} \quad (22)$$

$$\bar{Y} = \frac{\bar{H}\gamma}{\bar{E}p_0^2} \quad (23)$$

$$\bar{Z} = \frac{\bar{G}\gamma}{\bar{E}p_0^2} \quad (24)$$

Para resolver a equação (21) substitui a vazão mássica  $\dot{m}$  descrita por umas das equações abaixo, que depende do regime de escoamento do ar.

A vazão mássica através da ventosa é função da pressão atmosférica  $p_0$ , das temperaturas absolutas, externa  $T_0$  e interna  $T$ , da pressão absoluta  $p$  e das relações  $p/p_0$  e  $p_0/p$ . De acordo com Daily e Wylie têm-se quatro zonas:

- Zona 1: admissão de ar em regime crítico ( $p \leq 0,528 p_0$ ):

$$\dot{m} = \frac{0,686 C_{in} A_{PV} p_0}{\sqrt{\bar{R}T_0}} \quad (25)$$

- Zona 2: admissão de ar em regime subsônico ( $0,528 p_0 < p < p_0$ ):

$$\dot{m} = C_{in} A_{PV} \sqrt{7 p_0 \rho_0 \left[ \left( \frac{p}{p_0} \right)^{1,4286} - \left( \frac{p}{p_0} \right)^{1,714} \right]} \quad (26)$$

- Zona 3: liberação de ar em regime subsônico ( $p_0 < p < 1,894 p_0$ ):

$$\dot{m} = -C_{out} A_{PV} p \sqrt{\frac{7}{\bar{R}T} \left[ \left( \frac{p_0}{p} \right)^{1,4286} - \left( \frac{p_0}{p} \right)^{1,714} \right]} \quad (27)$$

- Zona 4: liberação de ar em regime crítico ( $p \geq 1,894 p_0$ ):

$$\dot{m} = -\frac{0,686 C_{out} A_{PV} p}{\sqrt{\bar{R}T}} \quad (28)$$

Onde  $C_{in}$  e  $C_{out}$  são os coeficientes de descarga da ventosa para entrada e saída de ar, respectivamente;  $A_{PV}$  é a área do orifício no final do intervalo de tempo;  $\rho_0$  é a massa específica do ar;  $T_0$  é a temperatura absoluta externa da tubulação;  $p_0$  é a pressão atmosférica local.

Então, de acordo com as equações (25) a (28) pode-se concluir  $\dot{m} = f(p')$ . De acordo com Lessa (1984), em muitas situações o intervalo de tempo adotado para efetuar os cálculos do transiente não é compatível com a suposição dada pela equação (12), ou seja, tem-se que o intervalo de tempo é muito pequeno. Neste caso torna-se necessário uma descrição de como se comporta a abertura e o fechamento do orifício da ventosa.

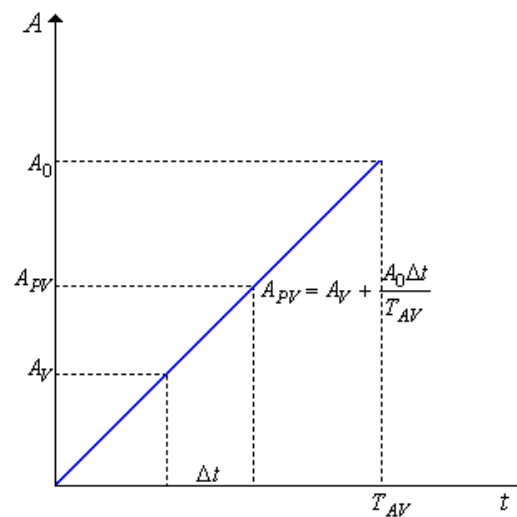
Neste trabalho foi feita a suposição, proposta por Lessa (1984), que a área do orifício da ventosa,  $A_V$ , varia linearmente de um intervalo de tempo para outro, a abertura e fechamento ocorrem não instantaneamente, através das seguintes leis:

a) Abertura

$$A_{PV} = A_V + \frac{A_0 \Delta t}{T_{AV}} \quad (29)$$

No caso em que  $A_{PV} > A_0$  faz-se  $A_{PV} = A_0$ .

**Figura 7: Abertura da válvula ventosa**



b) Fechamento

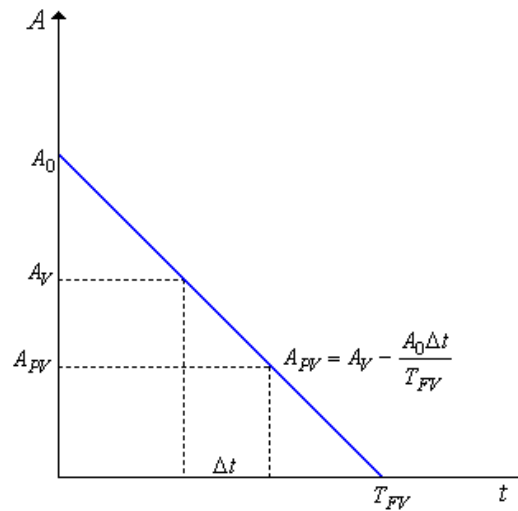
$$A_{PV} = A_V - \frac{A_0 \Delta t}{T_{FV}} \quad (30)$$

No caso em que  $A_{PV} < 0$  faz-se  $A_{PV} = 0$ .





Figura 8: Fechamento da válvula ventosa



Tem-se que  $A_V$  é a área do orifício no início do intervalo de tempo;  $A_0$  é a área do orifício totalmente aberto;  $T_{AV}$  é o tempo de abertura do orifício;  $T_{FV}$  é o tempo de fechamento do orifício.

### MÉTODO DA APROXIMAÇÃO PARABÓLICA

A solução da equação (21) para a admissão de ar, onde  $\dot{m}$  é dado pela equação (26) e para saída de ar, onde  $\dot{m}$  é dado pela equação (27), ambas em regime subsônico geram uma equação não linear em  $p'$ . Então, deve-se usar um método numérico para resolver o problema da não-linearidade.

Segundo Streeter (1978) a aproximação parabólica seria ideal para resolver este problema da não-linearidade das equações sem recorrer a métodos numéricos mais complexos ou que produzam um esforço computacional maior.

Na entrada de ar em regime subsônico o primeiro membro da equação (21) é uma parábola que sempre passa pela origem, então, é feita uma aproximação do valor de  $\dot{m}$  no segundo membro por meio de parábolas.

Assim, a vazão mássica em regime subsônico para entrada de ar é aproximada por uma parábola da forma:

$$\dot{m} = \bar{A}_1 p'^2 + \bar{A}_2 p' + \bar{A}_3 \quad (31)$$

Na faixa onde  $0,528 < p' < 1,0$ , o intervalo será dividido em número par de trechos,  $NR$ . Para um número par de intervalos  $I$ , tem-se:

$$I = \frac{(p' - 0,528)}{0,472} NR + 1 \quad (32)$$

Como uma parábola é definida por três pontos, então, a parábola nesta faixa deve passar pelos seguintes pontos  $[p'(I-1), \dot{m}(I-1)]$ ,  $[p'(I), \dot{m}(I)]$  e  $[p'(I+1), \dot{m}(I+1)]$  em que  $\dot{m}$  é calculado pela equação (26).

Os coeficientes  $\bar{A}_1$ ,  $\bar{A}_2$  e  $\bar{A}_3$ , para  $I=2,4,6,\dots,NR$  são armazenados para uso posterior, e os mesmos são calculados pelas equações a seguir:



$$\bar{A}_1(I) = \frac{\dot{M}_1(I+1) - 2\dot{M}_1(I) + \dot{M}_1(I-1)}{2[DP_1]^2} \quad (33)$$

$$\bar{A}_2(I) = \frac{\dot{M}_1(I+1) - \dot{M}_1(I) - \bar{A}_1(I)[P_1^2(I+1) - P_1^2(I)]}{DP_1} \quad (34)$$

$$\bar{A}_3(I) = \dot{M}_1(I) - \bar{A}_2(I)P_1(I) - \bar{A}_1(I)P_1^2(I) \quad (35)$$

Onde,

$$\dot{M}_1(I) = \bar{A}_4 \sqrt{[P_1(I)]^{1,4286} - [P_1(I)]^{1,714}} \quad (36)$$

$$P_1(I) = (I-1)DP_1 + 0,528 \quad (37)$$

$$DP_1 = \frac{0,472}{NR} \quad (38)$$

$$\bar{A}_4 = C_{in} A_{PV} \sqrt{7\rho_0 P_0} \quad (39)$$

Na saída de ar em regime subsônico a vazão mássica é aproximada por uma parábola da forma:

$$\dot{m} = \bar{B}_1 p'^2 + \bar{B}_2 p' + \bar{B}_3 \quad (40)$$

Na faixa onde  $1,0 < p' < 1,894$ , o intervalo será dividido em número par de trechos,  $NR$ . Para um número par de intervalos  $I$ , tem-se:

$$I = \frac{(p'-1)}{0,894} NS + 1 \quad (41)$$

Similarmente os coeficientes  $\bar{B}_1$ ,  $\bar{B}_2$  e  $\bar{B}_3$ , para  $I=2,4,6,\dots,NS$  são armazenados para uso posterior e os mesmos são calculados pelas equações a seguir:

$$\bar{B}_1(I) = \frac{\dot{M}_2(I+1) - 2\dot{M}_2(I) + \dot{M}_2(I-1)}{2[DP_2]^2} \quad (42)$$

$$\bar{B}_2(I) = \frac{\dot{M}_2(I+1) - \dot{M}_2(I) - \bar{B}_1(I)[P_2^2(I+1) - P_2^2(I)]}{DP_2} \quad (43)$$

$$\bar{B}_3(I) = \dot{M}_2(I) - \bar{B}_2(I)P_2(I) - \bar{B}_1(I)P_2^2(I) \quad (44)$$

Onde,

$$\dot{M}_2(I) = \bar{B}_4 \sqrt{\left[\frac{1}{P_2(I)}\right]^{1,4286} - \left[\frac{1}{P_2(I)}\right]^{1,714}} \quad (45)$$



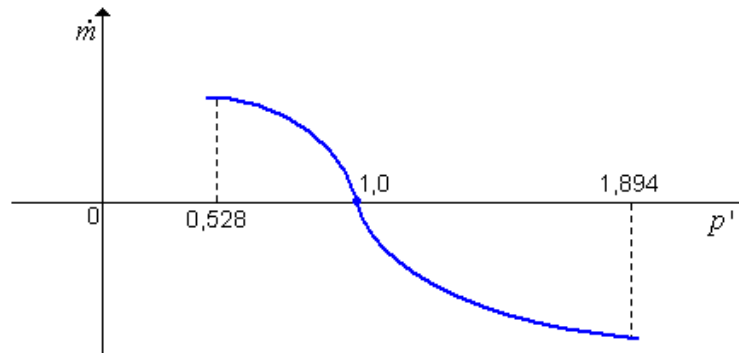
$$P_2(I) = (I - 1)DP_2 + 1 \quad (46)$$

$$DP_2 = \frac{0,894}{NS} \quad (47)$$

$$\bar{B}_4 = -C_{out} A_{PV} \sqrt{\frac{7}{RT_0}} \quad (48)$$

Ao encontrar o valor  $p$  deve-se, então, encontrar o valor de  $H_p(I, K)$  por intermédio da equação (16) e os valores de  $Q_p(I, K)$  e  $Q_p(J, 1)$  mediante as equações (5) e (6), respectivamente.

**Figura 9: Parábola de aproximação**



O passo seguinte consiste em determinar em qual zona de estabilidade encontra-se a parábola definida pela equação (21).

Na equação (21) tem-se que o lado esquerdo é sempre uma parábola que passa pela origem e do lado direito tem-se uma equação que depende de  $\dot{m}$ . De acordo com o tipo de fluxo, subsônico ou crítico, tanto de entrada como saída,  $\dot{m}$  assumirá o valor de uma das quatro equações da vazão mássica, da equação (25) até a equação (28).

De acordo com Streeter (1978) para que a equação (21) seja uma solução da ventosa, algumas considerações devem ser feitas dentro das quatro zonas, definidas logo a seguir.

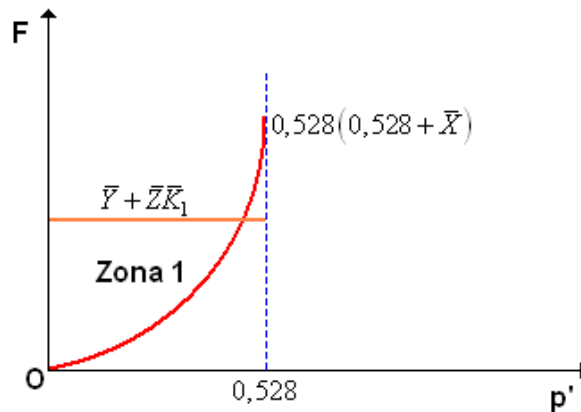
❖ Zona 1: admissão de ar em regime crítico ( $p' < 0,528$ )

Nesta zona, como a vazão mássica  $\dot{m}$ , dada pela equação (25), não depende de  $p'$ , então pode ser considerada como uma constante, isto é  $\dot{m} = \bar{D}_1$ , logo a equação (21) torna-se:

$$F = p'(p' + \bar{X}) = \bar{Y} + \bar{Z}\bar{D}_1 \quad (49)$$

Pelo fato da vazão mássica  $\dot{m}$  ser constante, então o termo da direita da equação 3.48, isto é  $\bar{Y} + \bar{Z}\bar{D}_1$  também é constante e o seu gráfico é uma reta horizontal. Logo, para que haja uma solução deve-se garantir que a parábola e a reta se cruzem em um ponto no domínio relativo à zona.

Figura 10: Zona de admissão em regime crítico



Como a parábola passa pela origem e tem concavidade voltada para cima, então os valores que  $F$  pode assumir são não negativos, portanto, para que haja uma solução compatível é necessário que a reta se localize acima do eixo das abscissas, isto é,  $\bar{Y} + \bar{Z}\bar{D}_1 > 0$ .

Nesta zona o maior valor de  $F$  dado pela parábola, ocorre para  $p' = 0,528$ , assim, os valores de  $F$  dados pela reta têm que ser menores que este valor limite, isto é,  $\bar{Y} + \bar{Z}\bar{D}_1 < 0,528(0,528 + \bar{X})$ .

Logo, a equação (49) possui raiz positiva, cuja solução pode ser expressa por:

$$(p')^2 + 2\bar{D}_2 p' - \bar{D}_3 = 0 \quad (50)$$

Onde:

$$\bar{D}_2 = \frac{\bar{X}}{2} \quad (51)$$

e

$$\bar{D}_3 = \bar{Y} + \bar{Z}\bar{D}_1 \quad (52)$$

Então, neste caso tem-se:

$$p' = -\bar{D}_2 + \sqrt{\bar{D}_2^2 + \bar{D}_3} \quad (53)$$

❖ Zona 2: admissão de ar em regime subsônico ( $0,518 < p' < 1,0$ )

Nesta zona de admissão de ar a vazão mássica  $\dot{m}$  pode ser aproximada por intermédio de uma função quadrática. Logo a equação (21) toma a seguinte forma:

$$F = p'(p' + \bar{X}) = \bar{Y} + \bar{Z}(K_1 p'^2 + K_2 p' + K_3) \quad (54)$$

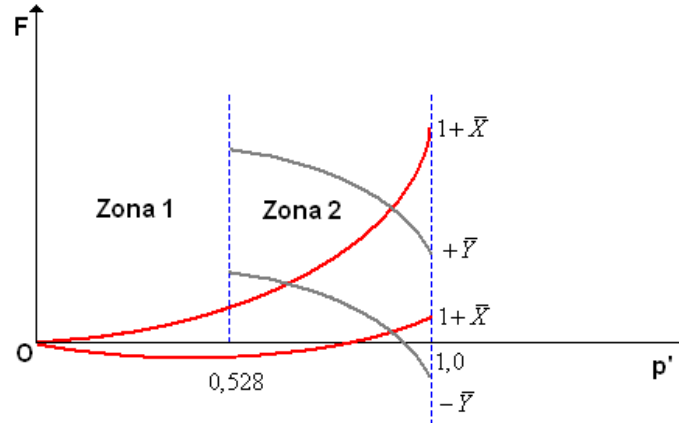
Para que se tenha uma solução válida dentro da zona é necessário que as seguintes condições sejam satisfeitas:

- 1) A parábola que passa pela origem deve ter um valor de  $F$  para  $p' = 1$  muito maior que o valor de  $F$  do ramo direito da parábola no mesmo ponto, isto é,  $1 + \bar{X} > \bar{Y}$ ;
- 2) A solução deve ter um valor positivo, pois se trata de um fluxo de admissão de ar. Logo,  $F = p'(p' + \bar{X}) > 0$ .
- 3) Como mostrado na Figura 11 é necessário que  $p'$  seja muito maior que zero.



De acordo com Peroba Júnior (2007), se a condição 1 for satisfeita, mas não a condição 2, então não há cavidade. Para a solução da equação quadrática em  $p'$  deve-se escolher a menor raiz, pois representa a solução referente ao ramo direito da parábola de aproximação.

**Figura 11: Zona de admissão em regime subsônico**



❖ Zona 3: liberação de ar em regime subsônico ( $1,0 < p' < 1,894$ )

Nesta zona de liberação de ar em regime subsônico, como a vazão mássica  $\dot{m}$  é negativa, então, só haverá solução para a equação (21) se o termo  $\bar{Y}$  for não negativo.

Além disso, observando a Figura 12, pode-se notar que: o termo  $\bar{Y}$  não deve ser menor que  $1 + \bar{X}$ , o termo  $p'(p' + \bar{X})$  deve ser não negativo e por fim,  $p' \geq 0$ .

❖ Zona 4: liberação de ar em regime crítico ( $p' \geq 1,894$ )

Para a saída de ar em regime crítico, tem-se novamente a vazão mássica  $\bar{E}_1$  negativa, logo,  $\bar{Y}$  deve ser positivo para que haja solução. A ordenada  $\dot{m}$  da Figura 12 no ramo direito da parábola para  $p' = 1,894$  é dada por:

$$\bar{E}_1 = \bar{Y} + 1,894 \bar{Z} \bar{E}_2 p_0 \quad (55)$$

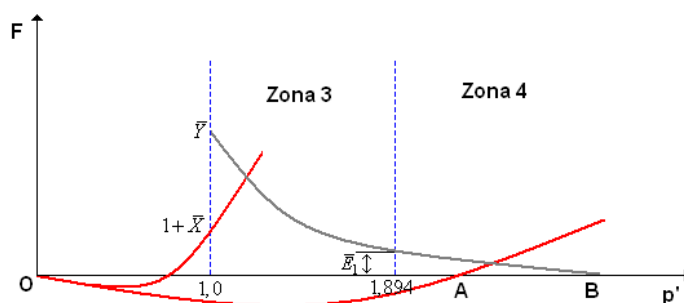
onde

$$\bar{E}_2 = -\frac{0,686 C_{out} A_{PV}}{\sqrt{RT}} \quad (56)$$

Para que haja solução nesta zona é necessário que o ponto A esteja à direita do ponto B (ver Figura 12), isto é

$$-\frac{\bar{Y}}{\bar{Z} \bar{E}_2 p_0} > -\bar{X} \text{ e } \bar{E}_1 \geq 1,894(1,894 + \bar{X}).$$

Figura 12: Zona de liberação em regime subsônico e crítico



Se nenhuma das condições de convergência for satisfeitas, então não há cavidade, isto é,  $V=0$  e  $\dot{m}=0$ .

## SIMULAÇÕES E RESULTADOS

Para este trabalho foi utilizado um trecho da Adutora Sertaneja, proposto por Barbosa (2006), como perfil para as simulações. Os mecanismos de alívio para o golpe de aríete contidos no programa UFC6 são os seguintes; Tanque de Alimentação Unidirecional (TAU), Chaminé de Equilíbrio e as Ventosas Automáticas de Duplo Efeito (VADE).

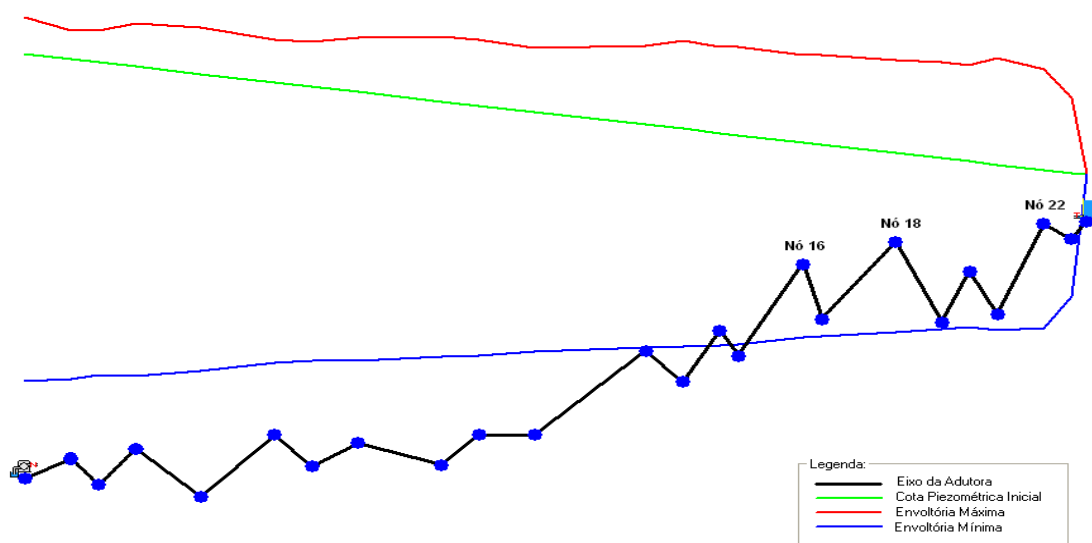
Estas ventosas se dividem em duas categorias: Ventosas automáticas de duplo efeito com abertura e fechamento instantâneos, trabalho realizado por Peroba Júnior (2007), e as Ventosas automáticas de duplo efeito de abertura e fechamento não instantâneos que é parte integrante deste trabalho de dissertação.

As simulações aplicadas ao perfil têm como objetivo principal o de analisar o comportamento das ventosas de abertura e fechamento não instantâneos, além de fazer um comparativo de seu funcionamento com ventosas de abertura e fechamento instantâneos.

O programa UFC6 apresenta as condições hidráulicas de trabalho por meio de envoltórias de máximas e mínimas (Figura 13). O problema proposto apresenta uma bomba na extremidade de montante, um reservatório com nível constante na extremidade de jusante e entre eles os demais nós considerados como junções.

Por meio da Figura 13, pode-se concluir que em alguns pontos da adutora a linha de envoltória mínima está abaixo do eixo da adutora, ocasionando pressões negativas durante o transiente, o que pode levar a tubulação a um colapso.

Figura 13: Problema Hidráulico





A seguir têm-se na Tabela 1 os valores obtidos para a maior carga e pressão máxima, e a menor carga e pressão mínima em cada nó.

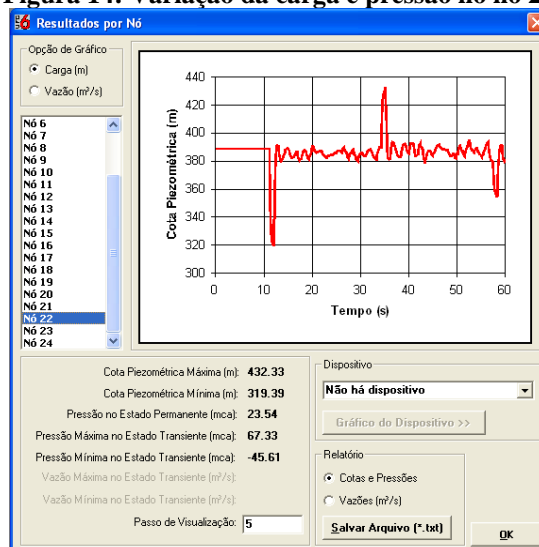
**Tabela 1: Cargas e pressões referentes ao problema hidráulico**

Nó	H (m)	Hmax (m)	Hmin (m)	P (mca)	Pmax (mca)	Pmin (mca)
1	439,00	455,23	296,56	195,00	201,23	42,56
2	436,71	449,44	297,41	174,01	186,74	34,71
3	435,33	449,05	298,90	184,13	197,85	47,70
4	433,49	452,43	298,90	166,49	185,43	31,90
5	430,28	450,56	300,84	184,28	204,56	54,84
6	426,61	445,15	304,53	153,61	172,15	31,53
7	424,78	444,42	305,53	165,58	185,22	46,33
8	422,48	445,95	305,35	152,98	176,45	36,85
9	418,36	446,67	307,12	158,36	186,67	47,13
10	416,52	445,12	307,13	143,52	172,12	34,72
11	413,77	441,64	309,18	140,77	168,64	36,18
12	408,26	442,71	311,00	98,56	133,01	1,30
13	406,43	444,71	311,67	110,33	148,63	15,57
14	404,59	442,01	312,02	86,09	123,51	-6,48
15	403,58	442,33	312,55	96,18	134,83	5,05
16	400,46	438,77	315,56	52,96	91,27	-31,94
17	399,55	438,63	315,89	76,05	115,13	-7,61
18	395,88	436,42	317,89	38,68	79,22	-39,31
19	393,58	435,63	319,06	71,78	113,83	-2,74
20	392,21	434,01	320,14	48,01	89,81	-24,06
21	390,83	437,25	318,64	65,13	111,55	-7,06
22	388,54	432,33	319,39	23,54	87,33	-45,61
23	387,18	420,05	333,30	28,66	61,55	-25,30
24	386,43	386,43	386,43	20,43	20,43	20,43

Analisando a Figura 13 e os dados apresentados na Tabela 1, pode-se ver que as menores pressões negativas ocorrem nos nós 16, 18 e 22, com valores, respectivos, de - 31,94 mca, -39,31 mca e - 45,61 mca. Estes valores podem causar sérios danos à estrutura e levar a tubulação a um colapso por contração. Neste caso pode-se concluir que o grande problema desta adutora está relacionado às pressões negativas. Logo, uma solução hidráulica eficiente significa elevar as pressões mínimas a valores aceitáveis, além de se reduzir as pressões máximas.

Na Figura 14 é apresentado um gráfico de como varia a carga e a pressão durante os primeiros 60 segundo do transiente no nó 22 que é o nó onde ocorre a menor pressão mínima, e conseqüentemente o mais solicitado.

**Figura 14: Variação da carga e pressão no nó 22**



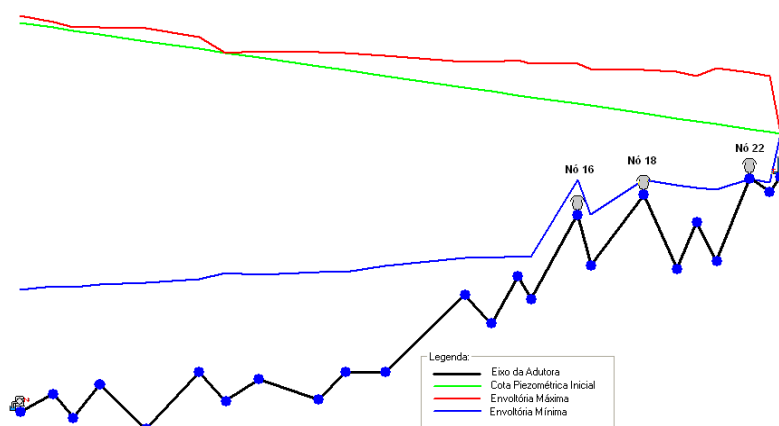
Neste trabalho foram propostas duas simulações com a utilização de ventosas automáticas de duplo efeito (VADE) como mecanismo de alívio para o golpe de aríete. As ventosas de duplo efeito utilizadas são de dois tipos:

- Ventosas automáticas de duplo efeito com abertura e fechamento instantâneos;
- Ventosas automáticas de duplo efeito com abertura e fechamento não instantâneos.

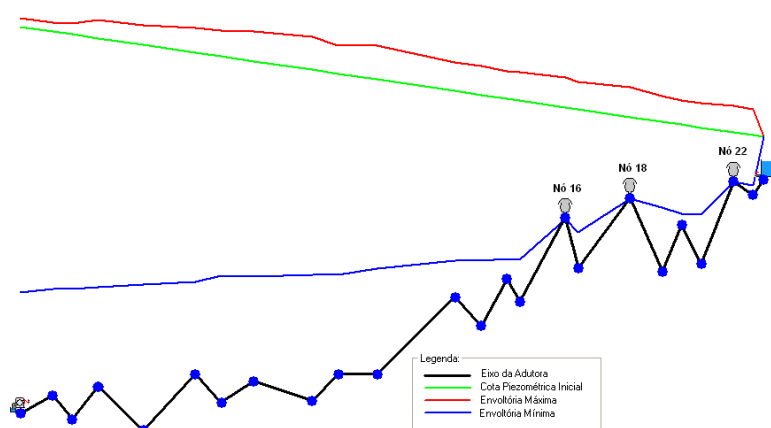
Inicialmente, aplicaram-se ventosas automáticas de duplo efeito com abertura e fechamento instantâneos (caso 1) e com as ventosas automáticas de duplo efeito com abertura e fechamento não instantâneos (caso 2), nos nós 16, 18 e 22, que são os mais solicitados quanto à pressão negativa. As Figuras 15 e 16 mostram os perfis de envoltória de máxima e mínima, respectivamente, para os casos 1 e 2.

Nas ventosas com abertura e fechamento não instantâneos (caso 2) foi utilizada uma metodologia em que tanto o tempo de abertura quanto o fechamento ocorrem não instantaneamente. Neste caso, o tempo de abertura considerado foi de 5 segundos enquanto o tempo de fechamento considerado foi de 10 segundos. Em ambos os casos as ventosas selecionadas são idênticas e possuem as seguintes características: diâmetro de 50 mm, carga barométrica local de 10,3 m, temperaturas externas e internas de, respectivamente, 26 °C e 27 °C e a constante dos gases igual a  $\bar{R}=287 \text{ J/kgK}$ .

**Figura 15: Perfil referente ao caso 1**



**Figura 16: Perfil referente ao caso 2**



Analisando as Figuras 17 e 18, pode-se constatar que a envoltória de máximas nos casos 1 e 2 reduzem-se indicando que houve uma redução das pressões máximas. Porém, no caso 2 houve uma maior eficiência quanto ao alívio destas pressões nas proximidades do reservatório (ver Figura 16). Em relação às pressões mínimas, em ambos os casos, houve uma elevação das envoltórias de mínimas, tendo esta linha ultrapassado a cota da adutora em quase todos os pontos.





Em seguida, nas Tabelas 2 e 3 são apresentados os valores de carga, pressão máxima e mínima para cada nó, referentes aos casos 1 e 2, respectivamente.

**Tabela 2: Cargas e pressões referentes ao caso 1**

Nó	H (m)	Hmax (m)	Hmin (m)	P (mca)	Pmax (mca)	Pmin (mca)
1	439,00	442,37	312,08	195,00	188,37	58,08
2	436,71	439,38	313,82	174,01	176,68	51,12
3	435,33	436,78	313,48	184,13	185,58	62,28
4	433,49	436,65	314,37	166,49	169,65	47,37
5	430,28	436,29	315,55	184,28	190,29	69,55
6	426,61	432,08	317,12	153,61	159,08	44,12
7	424,78	424,78	319,97	165,58	165,58	60,77
8	422,48	425,59	319,35	152,98	156,09	49,85
9	418,36	425,16	320,37	158,36	165,16	60,37
10	416,52	424,47	320,35	143,52	151,47	47,35
11	413,77	423,16	323,48	140,77	150,16	50,48
12	408,26	420,35	327,30	98,56	110,65	17,60
13	406,43	420,43	327,10	110,33	124,33	31,00
14	404,59	421,06	328,08	86,09	102,56	9,58
15	403,58	419,61	327,49	96,18	112,11	19,99
16	400,46	419,64	364,52	52,96	72,14	17,02
17	399,55	417,15	347,97	76,05	93,65	24,47
18	395,88	416,69	364,46	38,68	59,49	7,26
19	393,58	415,66	361,63	71,78	93,86	39,83
20	392,21	413,87	360,63	48,01	69,67	16,43
21	390,83	417,37	359,60	65,13	91,67	33,90
22	388,54	415,26	364,79	23,54	50,26	-0,21
23	387,18	413,60	362,98	28,66	55,10	4,48
24	386,43	386,43	386,43	20,43	20,43	20,43

**Tabela 3: Cargas e pressões referentes ao caso 2**

Nó	H (m)	Hmax (m)	Hmin (m)	P (mca)	Pmax (mca)	Pmin (mca)
1	439,00	443,21	312,08	195,00	189,21	58,08
2	436,71	441,04	313,84	174,01	178,34	51,14
3	435,33	440,73	313,48	184,13	189,53	62,28
4	433,49	442,45	314,37	166,49	175,45	47,37
5	430,28	439,85	315,55	184,28	193,83	69,55
6	426,61	438,40	317,12	153,61	165,40	44,12
7	424,78	437,23	319,97	165,58	178,03	60,77
8	422,48	436,77	319,35	152,98	167,27	49,85
9	418,36	434,20	320,37	158,36	174,20	60,37
10	416,52	429,80	320,35	143,52	156,80	47,35
11	413,77	429,95	323,48	140,77	156,95	50,48
12	408,26	421,78	327,30	98,56	112,08	17,60
13	406,43	420,30	327,10	110,33	124,20	31,00
14	404,59	417,76	328,08	86,09	99,26	9,58
15	403,58	417,38	327,49	96,18	109,88	19,99
16	400,46	414,60	347,03	52,96	67,10	-0,47
17	399,55	412,57	340,63	76,05	89,07	17,13
18	395,88	410,11	356,93	38,68	52,91	-0,27
19	393,58	406,03	352,66	71,78	84,23	30,86
20	392,21	403,64	349,65	48,01	59,44	5,45
21	390,83	402,67	349,21	65,13	76,97	23,51
22	388,54	401,12	364,75	23,54	36,12	-0,25
23	387,18	399,33	362,94	28,66	40,83	4,44
24	386,43	386,43	386,43	20,43	20,43	20,43

De posse dos dados apresentados nas Tabelas 2 e 3, pode-se concluir que realmente houve um alívio das pressões máximas, principalmente nos nós 1, 3 e 5, onde ocorreram as maiores pressões máximas. Houve,



também, um aumento das pressões mínimas, principalmente nos nós 16, 18 e 22, os mais solicitados. De acordo com estas tabelas pode-se ainda construir as seguintes tabelas para um comparativo entre as eficiências das ventosas aplicadas nos casos 1 e 2.

**Tabela 4: Maiores pressões máximas**

Pressão Máxima			
NÓ	Sem dispositivo	Caso 1	Caso 2
1	201,23 mca	188,37 mca	189,21 mca
3	197,85 mca	185,58 mca	189,53 mca
5	204,56 mca	190,29 mca	193,83 mca

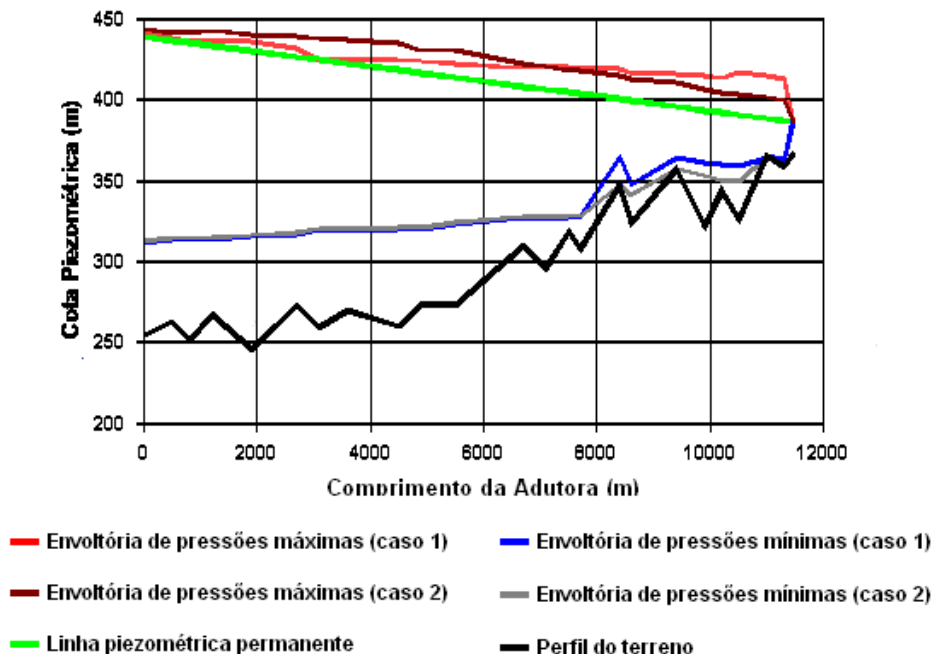
**Tabela 5: Menores pressões mínimas**

Pressão Mínima			
NÓ	Sem dispositivos	Caso 1	Caso 2
16	- 31,94 mca	17,02 mca	- 0,47 mca
18	- 39,31 mca	7,26 mca	- 0,27 mca
22	- 45,61 mca	- 0,21 mca	- 0,25 mca

De acordo com a Tabela 5, a maior diferença entre os dois casos ocorreu no nó 16, houve uma diferença de 17,49 mca entre os valores obtidos no caso 1 e no caso 2. Enquanto que no nó 22 as pressões mínimas tiveram quase o mesmo resultado, com uma diferença de 0,04 mca. No caso das pressões máximas, Tabela 4, a maior diferença entre os valores obtidos nos casos 1 e 2, ocorreu no nó 3, uma diferença de 3,95 mca. Enquanto que na bomba, nó 1, esta diferença foi igual a 0,84 mca.

Por meio da Figura 17 pode-se notar que próximo a bomba o caso 1 aliviou melhor as pressões máximas, ao passo que próximo ao reservatório ocorre o inverso. Ainda de acordo com esta figura, as envoltórias de mínimas têm valores bem próximos até aproximadamente o nó 16, então a partir daí tem-se que a eficiência para o caso 1 foi melhor.

**Figura 17: Envoltória de pressões dos casos 1 e 2**



Em resumo, pode-se concluir que as ventosas aplicadas no caso 1, foram mais eficientes tanto em relação à elevação das pressões mínimas, quanto ao alívio das pressões máximas. Porém, os valores obtidos no caso 2



são perfeitamente aceitáveis, e pode-se concluir que estas ventosas com abertura e fechamento não instantâneos são eficientes para solucionar este problema hidráulico.

## CONCLUSÕES

Foram feitas simulações em que se verificaram três situações: ventosas trabalhando em conjunto, ventosas trabalhando com tanques de alimentação unidirecionais e ventosas trabalhando com chaminé de equilíbrio.

Em seguida foram realizadas análises comparativas entre as ventosas automáticas de duplo efeito com abertura e fechamento instantâneos e as ventosas automáticas de duplo efeito com abertura e fechamento não instantâneos.

Em trabalhos anteriores foram mostrados que as ventosas automáticas de duplo efeito com abertura e fechamento instantâneos são dispositivos bastante eficientes tanto expulsando ar quanto admitindo ar na tubulação. Entretanto, neste trabalho, também, foi mostrado a eficiência das ventosas automáticas de duplo efeito com abertura e fechamento não instantâneos.

Após as simulações realizadas verificou-se que os resultados obtidos pelas ventosas de abertura e fechamento instantâneos foram mais efetivos em comparação com os resultados obtidos pelas ventosas com abertura e fechamento não instantâneos. Entretanto os resultados obtidos com a utilização de ventosas com abertura e fechamento não instantâneos são perfeitamente aceitáveis para solucionar o problema hidráulico proposto.

A principal razão desta diferença deve-se ao fato de que as ventosas automáticas de duplo efeito com abertura e fechamento não instantâneos a área do orifício da ventosa varia linearmente de um intervalo de tempo para outro.

O que se verificou também é que tanto o tanque de alimentação unidirecional quanto a chaminé de equilíbrio, devido à ausência de ar na sua modelagem e possuírem dimensões de orifícios bem maiores, apresentaram uma maior eficiência quando comparado com as ventosas trabalhando em conjunto.

Do ponto de vista econômico, as válvulas ventosas representam uma solução hidráulica satisfatória, pois são equipamentos de fácil instalação e manutenção, além do fato de serem bem mais compensadores do ponto de vista econômico.

A grande dificuldade na realização deste trabalho deve-se ao fato de que a literatura a respeito do estudo das ventosas é bem escassa, principalmente em relação a trabalhos publicados. A principal sugestão seria a pesquisa e a publicação de novos trabalhos relacionados às ventosas e sua importância como mecanismo de alívio do golpe de aríete.

Outra sugestão seria o estudo da modelagem computacional das ventosas automáticas de fechamento lento, que pelo fato de trabalharem com água tem a sua modelagem um pouco menos complexa.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BARBOSA, M. P. R. Modelagem Computacional de Chaminé de Equilíbrio e Tanques de Alimentação Unidirecional como mecanismo de alívio do Golpe de Aríete em Adutoras. 2006. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental - Universidade Federal do Ceará. 2006.
2. LESSA, R. C. Transientes Hidráulicos em Sistemas Complexos de Adução de Água. 1984. Dissertação de Mestrado Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo 1984.
3. PEROBA JUNIOR, F. Modelagem computacional de ventosas automáticas de duplo efeito como mecanismo de alívio do Golpe de Aríete. 2007. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental - Universidade Federal do Ceará. 2007.
4. REGABER. Manual técnico de válvulas ventosas. 2006
5. STREETER, V. L., WYLIE, E. B. Fluid Transients. MacGrawHill Editora. 1978.