

Determinação Experimental do Expoente Politrópico em Sistemas Hidráulicos – Escala Piloto

Carlos Augusto de Carvalho Magalhães

SABESP. Rua Dr. Costa Leite, 2000 – Vila Assunção – Botucatu – SP – Cep: 18606-820. carlosmagalbaes@sabesp.com.br

Hans George Arens, Rodrigo de Melo Porto

Escola de Engenharia de São Carlos. Av. Trabalhador São Carlense, 400 – Centro – Caixa Postal 359 – São Carlos – SP
arens@linkway.com.br, rodrigo@sc.usp.br

Recebido: 30/10/02 – revisão: 02/05/03 – aceito: 03/06/03

RESUMO

A presença de bolsões de ar em sistemas hidráulicos de transporte de água provoca descontinuidades na coluna líquida que podem causar sobrepressões perigosas. A partida de uma bomba ou a abertura de uma válvula a montante com a linha parcialmente cheia de ar podem originar sérios transientes.

No tratamento matemático de tais situações, no que concerne ao ar aprisionado, é necessário o uso da equação politrópica, cujo valor do expoente n depende da transformação sofrida pelo ar retido, que normalmente é considerado como um gás perfeito. Transformações muito lentas conduzem a $n = 1,0$ e as muito rápidas a $n = 1,4$, pois nesse caso as condições se aproximam às transformações adiabáticas. Dependendo do valor adotado para o expoente politrópico, o erro no cálculo da sobrepressão máxima gerada nos transitórios citados acima, pode chegar a ser superior a 100%. Assim, é importante avaliar o valor do coeficiente n , entre os dois valores, para efeito de projeto ou dimensionamento dos acessórios de controle dos transientes hidráulicos.

O presente trabalho apresenta uma metodologia experimental para a determinação do expoente politrópico (n) em um sistema hidráulico gravitacional, em escala piloto de laboratório, a partir de dados obtidos em cinco ensaios realizados sob diferentes condições.

Palavras-chave: bolsa de ar; coeficiente politrópico; transitórios hidráulicos.

INTRODUÇÃO

Nas adutoras alimentadas por recalque pode ocorrer a interrupção do abastecimento de água devido à falta de energia elétrica. Nessa situação, as bombas param de funcionar e podem provocar sub-pressões severas e conseqüentemente a separação de coluna. Essa separação de coluna, sempre que possível, deve ser evitada por causa das altas pressões geradas na rejunção das mesmas, quando a bolsa de vapor entra em colapso. Um dos dispositivos antigolpe muito empregado é o reservatório hidropneumático (RHO).

O RHO como se pode observar na Figura 1, possui uma porção inferior que contém água, enquanto a superior contém ar comprimido. Quando ocorre a falta de energia elétrica nos sistemas supracitados, ocorre inicialmente a sub-pressão e nessa situação o RHO funciona expandindo o ar e expulsando a água para a linha, com o objetivo de atenuar o golpe de aríete. Num segundo momento, haverá uma onda de sobre-pressão, isto é, no RHO o ar será

comprimido. Nessa condição, o ar funciona como um “amortecedor”. Portanto, durante o transiente, o ar inicialmente é expandido e depois comprimido.

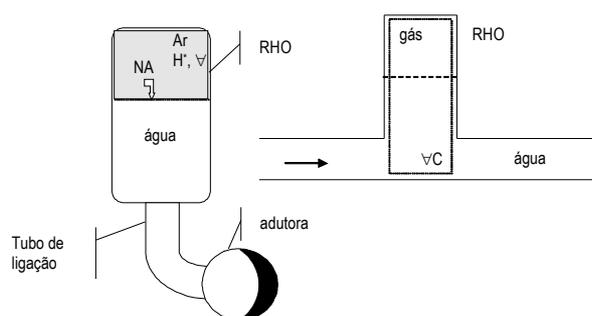


Figura 1 – Esquema de um RHO

Vários tipos de reservatórios hidropneumáticos (RHO) de ar ou gás são usados para ajudar a reduzir as pressões transientes em sistemas com líquidos. Numa análise do RHO mostrado na Figura 1, a pressão é considerada como sendo a mesma em todos os pontos do volume de controle (∇C) indicado em qualquer instante.

Admite-se que o RHO seja sem atrito e sem inércia, isto é, a compressibilidade do líquido no reservatório é considerada desprezível comparada com a compressibilidade do ar. Supõe-se que o ar siga a lei dos gases politrópicos.

$$H_0^* \nabla_0^n = H^* \nabla^n = \text{cte} \quad (1)$$

em que:

H^* : carga de pressão absoluta da bolsa de ar (m_{H2O});

∇ : volume da bolsa de ar (m^3);

n : expoente politrópico, definido como a razão entre o calor específico do ar a pressão constante e o calor específico a volume constante ($k = C_p/C_v$), sob pressão zero (adimensional);

índice 0 : variável na condição inicial;

m_{H2O} : metros de coluna de água.

Segundo WYLEN & SOONTAG (1976), a transformação politrópica também conhecida como a Lei de Boyle para o processo politrópico reversível, é definida por: $p \cdot \nabla^n = C$, e é uma aproximação de certas transformações reais para as quais a relação p e ∇ estaria representada por uma reta num gráfico bilogarátmico. Essa relação é frequentemente interligada no cálculo do trabalho W quando o processo politrópico é reversível pela substituição na relação $W = \int p d\nabla$. Sempre ocorrem trocas de calor num processo politrópico reversível exceto quando $n = k$, correspondente ao processo isoentrópico.

Wylie & Streeter (1978), recomendam que para sistemas hidráulicos pequenos nos quais a resposta é rápida, se adote o processo adiabático, ou seja, $n = 1,4$. Em sistemas maiores, com um grande volume de água e pequena massa de ar, o comportamento do gás será isotérmico ($n = 1,0$). Sugere-se, como média, o uso do valor de 1,2, a ser empregado nos projetos.

Uma situação semelhante, como se pode observar na Figura 2, ocorre quando devido à má operação de uma ventosa ou a não existência da mesma, em sistemas de elevada carga, o ar confinado no interior da tubulação permite a sua compressão a elevadas pressões. Nesse caso, mais uma vez admite-se, para o comportamento dos gases, a transformação politrópica.

No entanto, contrário ao RHO, nessa situação o ar age como uma mola atuando sobre a água que pode atingir velocidades elevadas possibilitando, assim, um grande aumento de pressão. Essas sobrepressões podem também ocorrer devido ao rápido enchimento da tubulação, ou à partida de uma bomba em um sistema hidráulico que contém ar confinado. Conforme relatado por Koelle (1998), esse ar confinado com energia armazenada, ao se expandir rapidamente, poderá provocar o deslocamento da tubulação e a ocorrência de sobrepressões no seu interior, detectadas através de deslocamentos estruturais e vazamentos nas juntas.

Magalhães (2001) verificou nos seus estudos que, dependendo do valor adotado do expoente politrópico, o erro no cálculo da sobrepressão máxima gerada nesse tipo de transitório, pode chegar a ser superior a 100%.

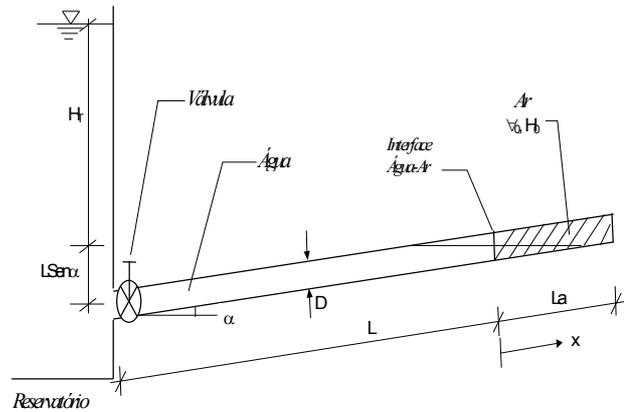


Figura 2 - Esquema idealizado para o estudo do efeito do ar aprisionado

Dáí a importância em estimar corretamente o expoente n , com o objetivo de determinar o mais próximo possível da realidade, a magnitude das pressões transitórias. O presente trabalho mostra a determinação experimental do expoente politrópico (n) em um sistema hidráulico de pequenas dimensões, no qual uma bolsa de ar confinada foi comprimida a partir de diferentes condições iniciais e de carga.

METODOLOGIA E RESULTADOS EXPERIMENTAIS

O modelo físico instalado no laboratório de hidráulica da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) é representado pela Figura 3. Compõe-se de um reservatório cuja superfície livre é mantida numa cota constante (fonte de energia) que alimenta um tubo de PVC de comprimento total ℓ , vedado na extremidade de jusante. Nesse extremo tem-se uma bolsa de ar confinada movimentando-se, durante todo o tempo de análise, em um trecho de tubo retilíneo cujo eixo forma com a horizontal um ângulo α constante (90°).

Na condição inicial, a válvula esférica está fechada e nessa situação o comprimento da bolsa é L_a e o comprimento da coluna líquida é L , sendo que $\ell = L + L_a$. Tem-se também que a carga de pressão absoluta da bolsa de ar é H_0^* e o volume ∇_0 .

O fenômeno estudado iniciou-se com a abertura brusca da válvula o que causa a aceleração da coluna líquida e a compressão da bolsa de ar.

Tem-se então a oscilação da coluna de água e da bolsa de ar que se amortece gradativamente e cessa totalmente na condição final na qual a pressão do gás se iguala à carga de pressão do reservatório sobre a bolsa de ar.

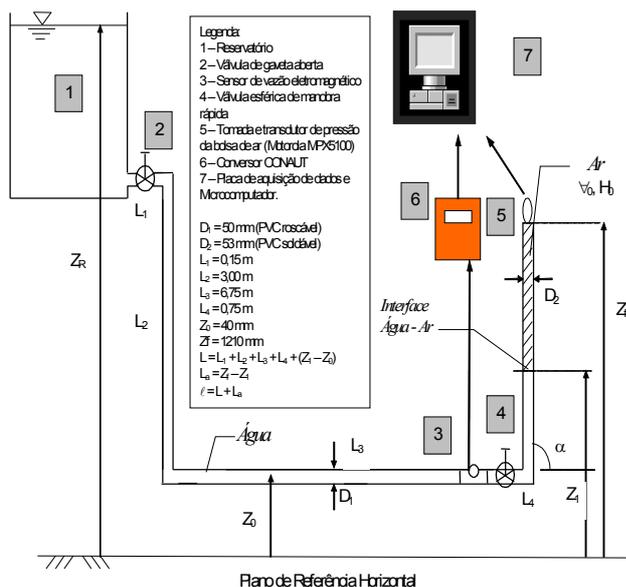


Figura 3 – Modelo físico instalado no laboratório de hidráulica

Cinco ensaios foram realizados, cada qual caracterizado pela carga hidráulica do reservatório (Z_R) e pelo comprimento inicial da bolsa de ar ($L_a = Z_f - Z_1$). Esses valores são apresentados na tabela 1:

Tabela 1 – Características dos experimentos

Manobra	Z_R (mm)	Z_1 (mm)
1	3993	263
2	3875	195
3	3874	265
4	3874	305
5	3873	580

A vazão $Q(t)$ e a carga de pressão absoluta da bolsa de ar $H^*(t)$, em um dado instante t , foram medidas utilizando-se, respectivamente, um medidor eletromagnético e um transdutor de pressão piezo-elétrico e os valores foram registrados a cada 0,01s por um sistema de aquisição de dados.

Para a determinação do expoente politrópico, partiu-se inicialmente da hipótese básica de que a massa de ar permanece constante durante o fenômeno, isto é:

$$\nabla = (L_a - x) \cdot A = \nabla_0 - \int_0^t Q(t) \cdot dt \quad (2)$$

Sabe-se que tanto a expansão quanto a contração da bolsa de ar são regidas pela equação politrópica para um gás ideal, Equação (1).

Verifica-se na Equação (1), independentemente do instante, que o produto de potências entre a carga de pressão absoluta e o volume da bolsa de ar deve ser constante, ou o mais próximo de uma constante, para um determinado valor de n .

Tem-se então que:

$$n = \frac{\log\left(\frac{H_0^*}{H^*}\right)}{\log\left(\frac{\nabla}{\nabla_0}\right)} \quad (3)$$

possibilitando assim o cálculo do expoente n , através da regressão linear simples (método dos mínimos quadrados). Por consequência, foram obtidas as Figuras 4 a 8:

O valor ótimo do expoente n , considerando-se a faixa de variação de 1,0 a 1,4, para cada manobra, é apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 – Melhor ajuste do expoente politrópico n

Manobra	n
1	1,3026
2	1,3342
3	1,3357
4	1,3426
5	1,4000
Média	1,3430

Pode-se observar que o valor médio de n foi de **1,34** próximo, portanto, às condições adiabáticas, confirmando a recomendação de Chaudhry (1979) para câmaras de ar de pequeno tamanho e transientes rápidos.

Na Figura 9 é apresentada ainda a evolução temporal da equação politrópica adimensionalizada. Observa-se que as curvas se aproximam bem a uma reta horizontal (ordenada igual a 1), com uma amplitude variando entre os valores de 0,98 a 1,05, o que mostra que os desvios se mantiveram abaixo de $\pm 5\%$, próximos da precisão do transdutor de pressão ($\pm 2\%$).

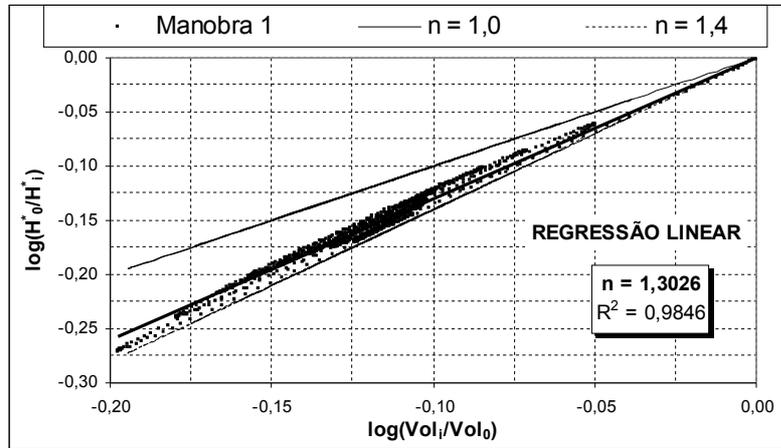


Figura 4 – Logaritmo da carga de pressão versus logaritmo do volume da bolsa de ar adimensionalizados, referentes à Manobra 1

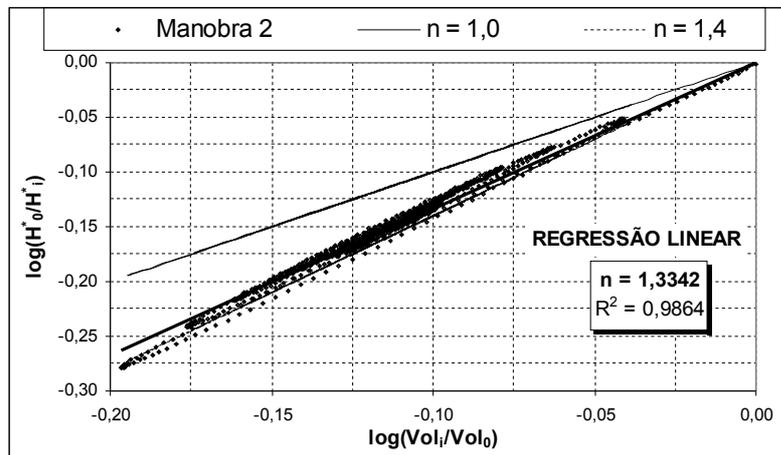


Figura 5– Logaritmo da carga de pressão versus logaritmo do volume da bolsa de ar adimensionalizados, referentes à Manobra 2

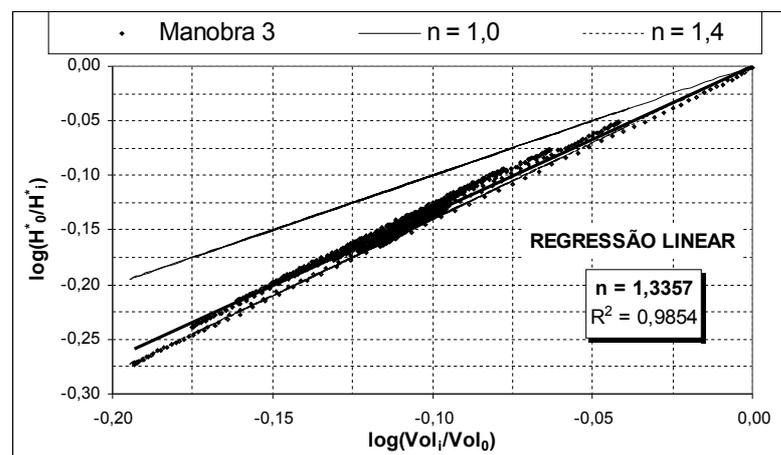


Figura 6 – Logaritmo da carga de pressão versus logaritmo do volume da bolsa de ar adimensionalizados, referentes à Manobra 3

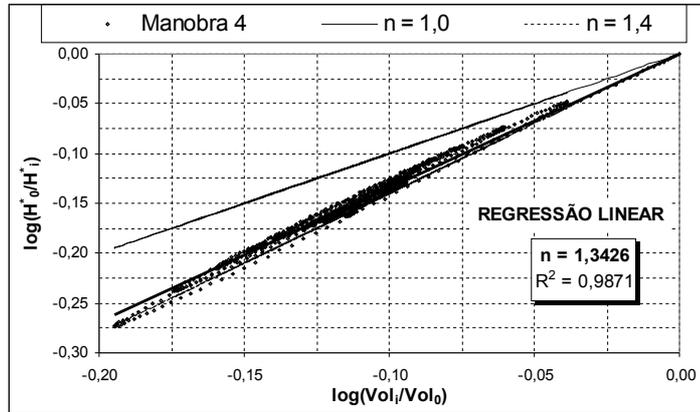


Figura 7 – Logaritmo da carga de pressão versus logaritmo do volume da bolsa de ar adimensionalizados, referentes à Manobra 4

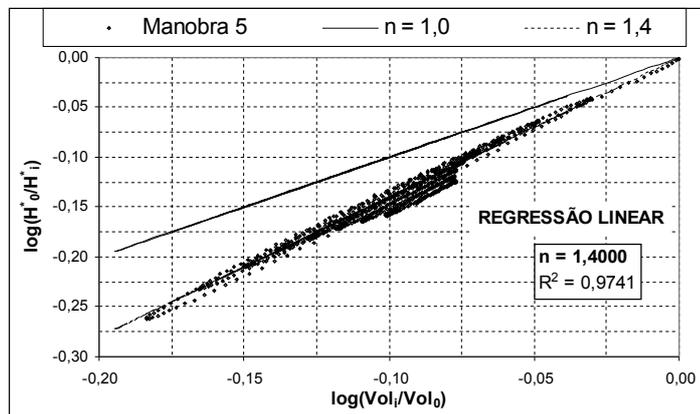


Figura 8 – Logaritmo da carga de pressão versus logaritmo do volume da bolsa de ar adimensionalizados, referentes à Manobra 5

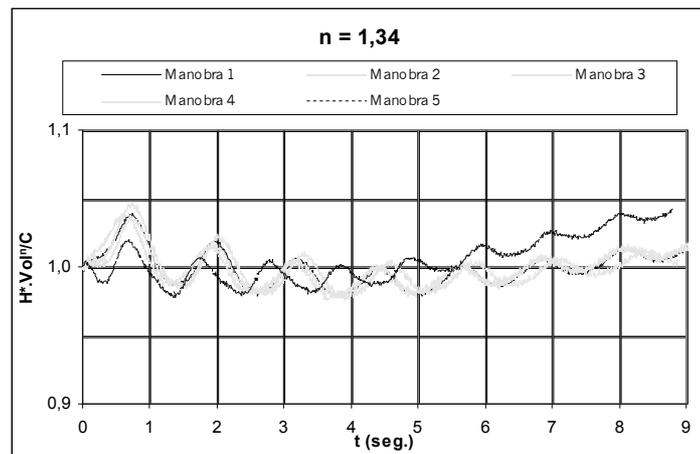


Figura 9 – Evolução temporal da equação politrópica adimensionalizada numa manobra de abertura, para $n = 1,34$

Discussão e Conclusão

As figuras 4 a 8 mostram os pontos experimentais, a reta resultante da regressão linear e, para a comparação, as retas teóricas correspondentes a $n=1$ e $n=1,4$. Nota-se que a dispersão dos pontos experimentais foi pequena, mesmo nos pontos da figura 4 que representa o ensaio nº1, realizado com o maior volume inicial. Tomando-se esse volume como referência, os volumes iniciais dos cinco ensaios realizados podem ser representados, na ordem, pelas parcelas 100%, 98,66%, 96,76%, 95,6% e 88,2%.

A solução da equação de Euler aplicada ao banco de ensaio, quer para fluidos reais, quer para o fluidos ideais, mostra que a frequência das oscilações das curvas $Q(t)$ e $H(t)$ é crescente com a diminuição do volume inicial. A transformação politrópica é então influenciada pela diminuição das trocas de calor, aproximando a compressão e a expansão da bolsa de ar às condições adiabáticas. A tabela 2 mostra bem esse efeito, pois o valor 1,4 (adiabático) foi alcançado apenas no 5º ensaio, o de menor volume inicial (88,2%).

Deve-se ainda ressaltar que os desvios na curva da razão $\frac{H^* \nabla^n}{H_0^* \nabla_0^n}$ em função do tempo t (figura 9), incluem o desvio de defasagem, como explicado na seqüência.

De fato, a relação entre as curvas teóricas $H^*(t)$ e $\nabla(t)$ obedece a expressão (1) $H^*(t)\nabla(t)^n = \text{cte}$ e mostra que os pontos máximos da curva $H^*(t)$ correspondem obrigatoriamente aos pontos mínimos da curva $\nabla(t)$ e vice-versa. Como a resposta do medidor de vazão é mais lenta do que a do transdutor de pressão ocorre um atraso Δt no registro da informação, causando um deslocamento entre todos os pontos, alterando a expressão (1) para $H^*(t)\nabla(t-\Delta t)^n$ e provocando dessa forma os desvios de defasagem. Estes se caracterizam pelo aparecimento de uma perturbação adicional, em forma de oscilação de pequena amplitude e com a mesma frequência da curva principal.

Essas considerações nos levam a concluir (figura 9) que a frequência das vazões e das pressões dos ensaios se situaram no intervalo 0,6 e 1,25 Hz e que os desvios reais são ainda menores do que o valor $\pm 5\%$ já comentado.

Finalmente, os resultados obtidos confirmaram as recomendações de Wylie & Streeter (1978) e Chaudhry (1979), e mostram que o valor de n pode ser alterado em muitas aplicações de pequenas dimensões para $n=1,34$.

REFERÊNCIAS

- CHAUDHRY, M.H. *Applied Hydraulic Transients*. New York, Von Nostrand Reinhold Co., 1979.
- KOELLE, E. *Educação Continuada em Engenharia Hidromecânica. Módulo 3: Tubulações para transporte de líquidos*. São Paulo, 1ª edição, Ed. Koelle Engineering, 1998.

Parte B: Acessórios de tubulações: ventosas e descargas (dimensionamento, instalação e operação) – Capítulo 3: Enchimento de Adutoras.

- MAGALHÃES, C.A.C. *Estudo analítico e experimental dos fenômenos transitórios ocasionados por grandes bolsas de ar confinadas nos sistemas hidráulicos*. São Carlos, 2001. 136p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- STREETER, V.L.; WYLIE, E.B. *Hydraulic Transients*. New York, McGraw-Hill Book Company, 1967. p.209-217.
- WYLEN, G.J.; SONNTAG, R.E. *Fundamentos da Termodinâmica Clássica*. São Paulo, 2ª edição, Editora Edgard Blücher, 1976. Pgs.: 165-167.
- WYLIE, E.B.; STREETER, V.L. *Fluid Transients*. New York, McGraw-Hill Book Company, 1978. 384p.
- STREETER, V.L.; WYLIE, E.B. *Mecânica dos Fluidos*. São Paulo, 7ª edição, McGraw-Hill do Brasil Ltda., 1982. Tradução: Milton Gonçalves Sanchez.

Experimental Determination of the Polytropic Exponent in Hydraulic Systems – Pilot Scale

Abstract

The presence of air pockets in hydraulic water transport systems causes discontinuities in the liquid column, that may cause dangerously high pressures. A pump or a valve opened upstream, when the line is partly full of air, may cause serious transients.

In the mathematical treatment of such situations, as regards captured air, it is necessary to use polytropic equation, in which the value of exponent n depends on the transformation undergone by the air retained, which is usually considered a perfect gas. Very slow transformation lead to $n=1.0$, and very fast ones to $n=1.4$, since in this case conditions approach them to adiabatic transformations.

Depending on the value adopted for the polytropic exponent, an error in calculating the maximum excess pressure generated in the transients mentioned above, may be higher than 100%.

Thus, it is important to know the value of coefficient n , between the two values, in order to design or size the accessories to control hydraulic transients.

This study shows an experimental methodology to determine the polytropic exponent (n) in a gravitational hydraulic system, on a pilot scale in the laboratory, based on data obtained in five assays performed under different conditions.

Key words: air pocket; polytropic coefficient; hydraulic transients.