

MODELAÇÃO DO FUNCIONAMENTO DE UM RESERVATÓRIO DE AR COMPRIMIDO - DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DE OPERAÇÃO Modeling the Operation of a Surge Air Vessel. - Definition of Operating Parameters

HUGO COSTA ⁽¹⁾, JOSÉ TENTÚGAL-VALENTE ⁽²⁾ e MANUEL PACHECO-FIGUEIREDO ⁽³⁾

⁽¹⁾Mestre Engenharia Civil, FEUP,
Rua do Dr. Roberto Frias, s/n, 4200 – 465 Porto, ec06102@fe.up.pt

⁽²⁾ Professor Associado, FEUP,
Rua do Dr. Roberto Frias, s/n, 4200 – 465 Porto, tvalente@fe.up.pt

⁽³⁾ Professor Auxiliar, FEUP,
Rua do Dr. Roberto Frias, s/n, 4200 – 465 Porto, mpfiguei@fe.up.pt

Resumo

Em sistemas hidráulicos que integram condutas sob pressão, o fechamento de um órgão obturador (condutas gravíticas) ou a paragem abrupta no funcionamento do grupo elevatório (condutas elevatórias), causam alterações ao escoamento permanente dando origem a regimes variáveis caracterizados pela modificação da velocidade média e pressão ao longo da conduta e com variabilidade temporal. O fenómeno de propagação da onda de pressão causado por essas alterações ao escoamento é denominado de “Choque Hidráulico” ou “Golpe de Aríete”.

O presente projeto constitui um estudo de avaliação das principais variáveis e parâmetros de funcionamento de um reservatório de ar comprimido integrado num sistema adutor elevatório como órgão de proteção à ocorrência deste fenómeno a que ficará sujeito a variações de pressão resultantes e focado, essencialmente, na análise de pressões em várias secções do sistema elevatório. O desenvolvimento do estudo incide particularmente na especificidade e na complexidade que ocorrem na modelação do funcionamento de um reservatório de ar comprimido em que a sua ligação à conduta elevatória principal é realizada em trechos de diâmetros muito diferentes. Esta situação é corrente na grande parte das instalações em exploração sem, contudo, ser devidamente considerado o efeito ou efeitos daí resultantes.

A análise e avaliação dos principais parâmetros de funcionamento do RAC, teve como princípio a comparação de resultados obtidos por modelos teóricos e as medições locais efetuadas num sistema elevatório integrado no Sistema Multimunicipal de Abastecimento de Água concessionado à empresa Águas do Noroeste, SA, designado por Barradas e localizado em Vila Nova de Famalicão. Os principais critérios de escolha dos modelos teóricos utilizados resultam do facto de serem “softwares” livres, disponíveis a toda a comunidade científica e em que a base do seu algoritmo de programação seja estruturado pelo Método das Características, que é o método matemático atualmente mais utilizado.

Palavras-chave: Choque hidráulico, regimes variáveis, pressão, RAC, método das características

Abstract

In hydraulic systems incorporating pipelines under pressure, closing a valve (gravity pipelines) or an abrupt stopping of a pump (pumping line) causes changes in the flow leading to hydraulic transients regimes characterized by changes in the average speed and the pressure over the pipeline along the time. The phenomenon of pressure wave propagation caused by these changes in the flow is known as "hydraulic shock" or "water hammer".

This project is a study of the main variables and operating parameters of a surge air vessel integrated into a pump pipeline system as a mean to prevent the occurrence of this phenomenon and is mainly focused on the analysis of the pressures in various sections of the water pumping system. The study focuses particularly on the specificity and complexity that occur when modelling the behaviour of an air chamber which connection to the main pipeline is made by sections of very different diameters. This is a usual situation in the most of the systems in service, although, without properly considering the effects resulting from there.

The analysis and evaluation of the main operating parameters of the air compressed reservoir - RAC (or Surge Air Vessel), was based in the comparison of the results obtained by theoretical models and “*in-situ*” measurements made in Barradas water pumping system which is integrated in the Sistema Multimunicipal de Abastecimento de Água (Multi-city Water Supply System) operated by Águas do Noroeste, S.A, and located in Vila Nova de Famalicão. The main criteria to select the theoretical models resulted from the fact that they are freeware software, available to the entire scientific community and with a programming algorithm based on the Method of Characteristics, which is currently the most used mathematical method.

Keywords: Water hammer, unsteady flows, pressure, RAC, method of characteristics

1. Introdução

Os sistemas hidráulicos constituídos por condutas com escoamento em regime permanente sob pressão, quando sofrem alterações nas condições do seu funcionamento ocasionam regimes variáveis. Essas alterações caracterizam-se pela modificação da velocidade média e da pressão, ao longo do tempo, em qualquer secção da conduta. Essas alterações ao escoamento dão origem a um fenómeno de propagação de ondas de pressão denominado de “Choque Hidráulico” ou “Golpe de Ariete”, gerando variações de pressão e de caudal capazes de mobilizarem forças de natureza elástica resultantes da compressibilidade da água e da deformabilidade da conduta.

Durante a ocorrência desse fenómeno, os escoamentos transitórios originados podem comprometer funcionalmente e estruturalmente todos os equipamentos e dispositivos constituintes do sistema elevatório.

Dessa forma, para atenuar as elevadas variações de pressão geradas, idealizaram-se vários dispositivos de proteção, dos quais se salienta o Reservatório de Ar Comprimido, por ser um dos mais eficazes e mais utilizados atualmente.

Este dispositivo consiste num reservatório de água fechado em permanente ligação com a conduta que se pretende proteger e que contém no seu interior um gás comprimido, geralmente ar. Poderá a superfície de separação ar-água ser livre, mas também poderá tal separação ser realizada através de uma manga de borracha ou equivalente, que possibilita a separação dos fluídos no seu interior.

Considerado um equipamento potencialmente perigoso devido às suas condições de funcionamento (sob pressão), é essencial que o seu funcionamento seja bem analisado e estudado, e adaptado a cada situação específica, pois caso isso não se verifique poderá a segurança dos equipamentos ficar comprometida, assim como do ambiente envolvente e, muito principalmente, de pessoas.

Assim sendo, considera-se que será importante desenvolver um estudo experimental que analise e avalie o funcionamento de um Reservatório de Ar Comprimido com características muito próprias e diferentes das idealizadas teoricamente e a sua adaptabilidade a modelos teóricos que constituam uma base para análises futuras em situações análogas.

A finalidade deste projecto é desenvolver um estudo prático acerca do funcionamento de um Reservatório de Ar Comprimido que contrariamente ao idealizado na teoria da especialidade, a sua ligação à conduta principal é realizada por uma conduta composta por trechos de diâmetros muito diferentes, tal como acontece em grande parte das aplicações práticas.

2. Caso de Estudo

2.1. Sistema elevatório de Barradas

A estação elevatória de Barradas é uma estação elevatória em adução com reservatório de regularização, o que exige a implantação de um reservatório a montante dos grupos elevatórios.

O mecanismo de elevação da água inicia-se neste reservatório, com a condução da água de cada célula através de uma conduta vertical (cerca de 6 m – FFd DN500) ligada a um coletor de aspiração em ferro fundido dúctil (FFd DN700) que encaminha o escoamento até aos grupos elevatórios.

Já na estação elevatória propriamente dita, a água pode seguir, por dois ramais independentes, que são o ramais de Cerite e Joane e Santa Tecla. Estes garantem o fornecimento de água à zona urbana e à zona leste do concelho de Vila Nova de Famalicão respetivamente. No âmbito do presente trabalho, estudou-se apenas o ramal de Cerite. A elevação de água nesta conduta elevatória é assegurada por 2 grupos eletrobomba com variadores de velocidade, funcionando em 1 + 1 permitindo, cada um, a elevação de caudal nominal de aproximadamente 194 l/s a uma altura manométrica de 139 m, com uma potência instalada de 350 kW. São grupos elevatórios da marca EFAFLU, de eixo vertical, com velocidade de rotação 1450 rpm. A conduta elevatória parte à cota 96,40 m e finaliza no reservatório de Cerite a uma cota superior (aproximadamente 205 m), estabelecendo-se essa ligação através de uma conduta em ferro fundido FFd DN350 PN16, com uma extensão estimada em 1735 m. Esta conduta apresenta um trajeto praticamente ascendente, sendo munida ao longo do mesmo de duas ventosas e duas válvulas de descarga.

2.2. Reservatório de ar comprimido

O RAC desta estação encontra-se implantado no exterior da câmara de manobras onde estão instalados os grupos elevatórios.

Este dispositivo de proteção ao choque hidráulico, que é alvo de análise neste trabalho, foi construído em 1998 e apresenta como principais características uma pressão máxima admissível de 25 bar e um volume de 10,337 m³.

Esta estação conta com dois reservatórios verticais iguais que funcionam de forma independente, uma vez que cada um está ligado a um sistema elevatório designados por Cerite e Joane/Santa Tecla. Ambos estão instalados à cota de 96,35 m e com uma altura de cerca de 4,7 m, o que corresponde a uma cota máxima de 101 m. A derivação para a conduta não é provida de qualquer tipo de estrangulamento, sendo esta constituída por dois trechos em DN300 ligados por uma curva a 90° (completando 4,5 m) com ligação a uma junta de desmontagem e a uma válvula em borboleta.

A medição dos níveis de água no seu interior é feita com recurso a medidores de nível analógico, visíveis pelo exterior. Esta medição é constituída por quatro níveis: baixo, médio, normal e alto. Quando o nível de água cruza estes patamares pré-estabelecidos é transferida essa informação para a central de comandos registando todas as mudanças de patamares. Estes RAC, projetados inicialmente para proteger unicamente a conduta de Joane e Santa Tecla, foram alvo de uma intervenção posterior à sua instalação, com a finalidade de proporcionar, também, alguma segurança em relação ao choque hidráulico na conduta de Cerite.

Como se deduz pela Figura 1, a ligação do RAC à conduta em causa, só seria possível com o contorno pela face superior ou inferior da outra conduta e recorrendo a trechos de menor diâmetro. Dessa forma, a opção tomada recaiu sobre a primeira hipótese através de uma conduta DN80, aproveitando a ligação da conduta de descarga para facilitar a ligação.



Figura 1. Fotografia do atual “poço de manobras” do RAC.

3. Ensaios Realizados

Com a finalidade de modelar o comportamento de um RAC, procedeu-se a uma análise comparativa entre ensaios de choque hidráulico num caso real e a adaptação do mesmo a um modelo teórico, tendo como referência a instalação já introduzida e descrita anteriormente.

3.1. Metodologia

O estudo realizado teve como base a análise de pressões em vários pontos do circuito hidráulico de forma a compreender a influência do RAC na atenuação de variações de pressão aquando da ocorrência do choque hidráulico.

Assim sendo, escolheram-se quatro secções do circuito hidráulico que se consideram como tendo significado no estudo deste fenómeno, tal como referido no Quadro 1. No entanto também foram considerados outros critérios nessa escolha, nomeadamente a facilidade e rapidez de instalação dos RAC.

Quadro 1. Identificação e localização das secções de medição

Secção	S1	S2	S3	S4
Equipamento	Grupo Elevatório	RAC	Ventosa	Reservatório Cerite
Local de Instalação	Conduta Bomba 2	Corpo RAC	Acoplado ventosa	Conduta
Distância ao G.E.(m)	0,50	19,60	1000	1732

A medição de pressões e a sua evolução no tempo fez-se com recurso a “dataloggers” da marca GEMINI tipo TINYTAG PLUS para pressões máximas de 16 bar, através dos quais é possível registar e armazenar informação em intervalos de 1 a 10 s.

Após a recolha de dados, toda a informação é facilmente descarregada através de software próprio para um computador. Previamente à obtenção de dados resultantes da paragem provocada no grupo elevatório, procedeu-se ao registo de pressões nesses pontos durante alguns dias, de forma a criar um registo das variações de pressão nas diferentes secções durante o normal funcionamento do sistema elevatório. Posteriormente foram realizados dois atos experimentais, que constaram genericamente em ensaios do tipo “pára-arranca” do grupo elevatório através do acionamento manual de paragem de emergência.

De notar que pelo facto de todo o sistema elevatório se encontrar a funcionar em modo automático, controlado desde a central de comando na ETA de Areias de Vilar, obrigou a alterar previamente esse modo de funcionamento para manual. Esse procedimento é essencial para obter resultados satisfatórios nos vários ensaios uma vez que com funcionamento em modo automatizado, seria impossível recriar um cenário de interrupção brusca do fornecimento de caudal, pois a paragem da bomba seria mais gradual o que atenuaria o efeito de choque hidráulico. Todos os atos experimentais serão descritos e pormenorizados nos capítulos seguintes.

A análise teórica do comportamento da estação elevatória de Barradas, foi constituída por duas etapas:

- “Pré-Análise” com recurso a uma folha de cálculo em Excel, programada com o Método das Características, desenvolvido pelo Prof. Dr. Manuel Pacheco Figueiredo para a disciplina de Sistemas de Abastecimento de Água do ramo de Hidráulica de Engenharia Civil da FEUP.
- Programa em software Matlab®, desenvolvido por Valente (2008) cujo algoritmo de cálculo do modelo teórico é baseado também no método das características.

Por fim, recolhidos os resultados para diferentes caudais de elevação, estabelece-se uma comparação entre os dados obtidos experimentalmente e os adquiridos através de modelos teóricos.

3.1.1. Teste experimental 1

Para esta experiência foram realizadas as medições de pressão nas secções atrás indicadas resultantes da ocorrência de uma paragem brusca do grupo elevatório.

Com vista a compreender a influência do caudal no estudo do fenómeno, analisaram-se diferentes cenários de caudais de bombagem nas duas bombas, de acordo com o exposto no Quadro 2.

Como as bombas funcionam em reserva mútua, isto é, não funcionam em simultâneo, realizaram-se ensaios com uma grande gama de caudais (450, 500, 550, 600 a 650 m³/h) apenas na bomba 1. Por forma a perceber se o facto de estar a trabalhar com uma bomba em detrimento da outra, influencia os resultados obtidos, ensaiou-se o maior caudal para a bomba 2, possibilitando assim uma comparação de comportamentos de ambas e a sua influência na evolução do fenómeno.

Quadro 2. Ensaios realizados

Dados Ensaios		
bar	Ensaio	Caudal (m ³ /h)
1	1	450
	2	500
	3	550
	4	600
	5	650
2	6	650

Atente-se que a interrupção propositada da bomba apenas foi executada quando se verificou constância nas pressões observadas no registador instalado na conduta de compressão, pois apenas nessas condições é que o fenómeno de choque hidráulico poderia apresentar valores representativos e com significado para o presente estudo.

No que se refere aos resultados obtidos, pela análise dos gráficos ilustrados na Figura 2, deduz-se logo à primeira vista, que os picos de pressão acontecem tanto no arranque da bomba como na sua paragem.

No entanto, e tal como o nome “pico” indica, esses valores só se registam em intervalos de tempo muito curtos, cerca de alguns segundos

É possível perceber também que esses picos se fazem sentir em todas as secções em análise quase em simultâneo, excetuando-se o reservatório de Cerite, em que essa influência quase não se verifica.

Desta análise gráfica, infere-se também que quanto maior o caudal bombeado, maior é o valor da depressão criada na conduta, principalmente na secção 1 e 2. Relativamente a pressões máximas, no momento do arranque, foi igual em todos os ensaios realizados.

Tal como referido anteriormente, numa primeira etapa de pré-análise dos resultados obtidos, foi usada a folha de cálculo em EXCEL.

Apesar de todas as limitações dessa folha de cálculo, devido às simplificações inerentes ao mesmo, conclui-se que a diferença de pressões entre o modelo e o protótipo se aproximavam a 4bar para caudais de 650m³/h na secção do RAC.

Para a obtenção desses resultados, considerou-se que a ligação entre o RAC seria apenas constituída por um trecho único em DN80, considerando as perdas de carga na tubeira função desse diâmetro.

A escolha por este diâmetro em detrimento do DN 300, deve-se ao facto do programa apenas considerar a ligação em diâmetro único e por este traduzir perdas de cargas maiores, correspondendo assim a um cenário de pressões mais gravoso.

Rapidamente se conclui que apesar das limitações da folha de cálculo, que tão gravosas diferenças de pressão se deveram sobretudo às perdas de carga na ligação que não foram consideradas.

Conclui-se também que a utilização simplista do método das características se verificou ineficaz, inadequada e inadaptado ao caso em estudo, pelo que daqui em diante se optou por utilizar apenas o programa em MATLAB®.

No entanto, com a utilização do referido software verificou-se também a inadaptação do modelo teórico na secção do RAC, às características dessa secção na estação elevatória de Barradas. Tal facto deve-se a que este programa considera apenas a conduta de ligação em diâmetro único.

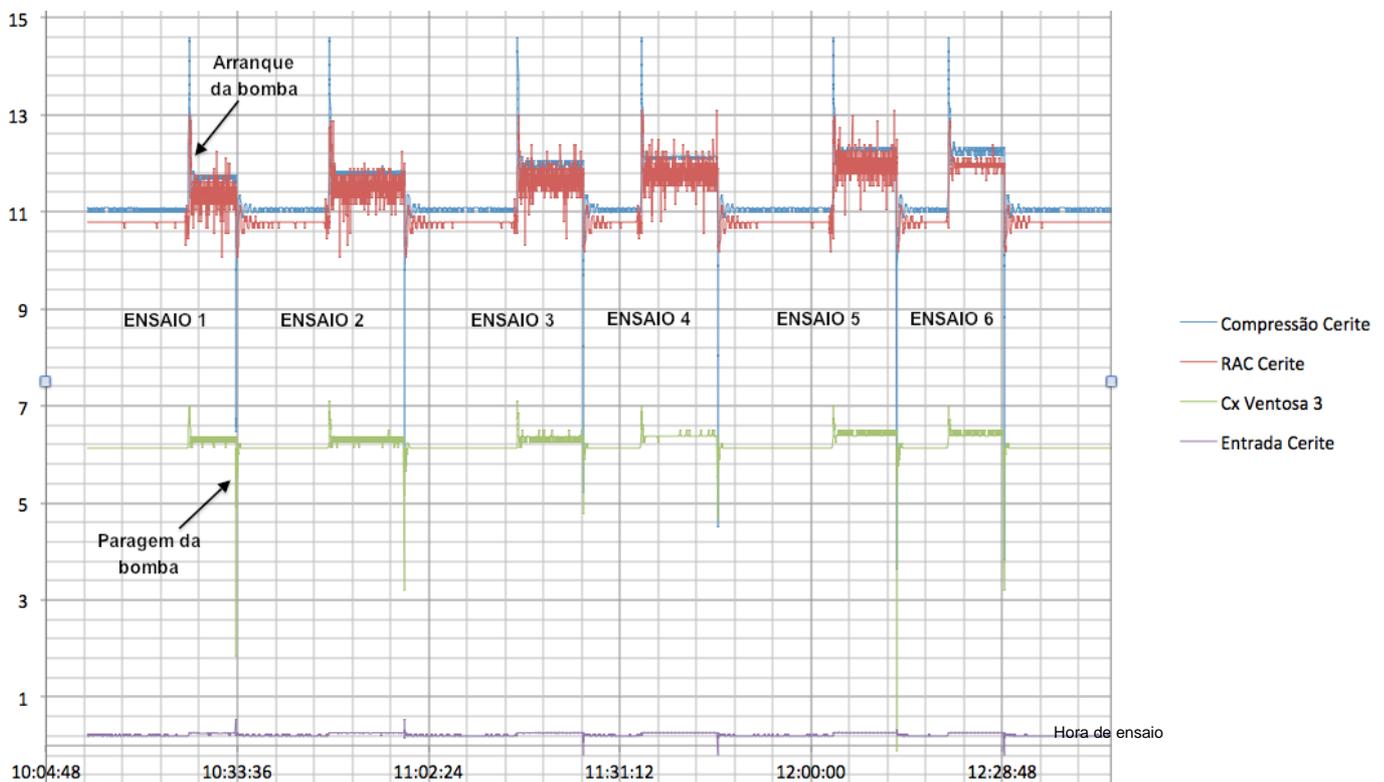


Figura 2. Registo de pressões nas quatro secções nos vários ensaios.

De forma a contornar esse problema, consideraram-se dois cenários de análise:

- Ligação em DN 80 com 4.45 m e introdução de perda de carga localizada para traduzir o efeito da perda de carga do trecho em DN300, não considerando perdas de carga na tubeira.
- Ligação em DN 300 com 4.5 m e introdução de perda de carga localizada para traduzir o efeito da perda de carga do trecho em DN80, não considerando perdas de carga na tubeira, pois esta não existe.

No entanto, a necessidade de testar estes cenários levou a que fosse introduzida uma nova incógnita neste estudo, a perda de carga ao longo da conduta.

Desta forma tornou-se necessário quantificar esse parâmetro através de novas medições no protótipo, resultando numa segunda fase de ensaios que será descrita no capítulo seguinte.

3.1.2 Teste experimental 2

Neste ensaio, e com o objetivo de quantificar a perda de carga na tubagem de ligação ao RAC, foi utilizado um “datalogger” adicional na ligação da tubagem em DN80 com a DN300.

A escolha dessa secção deveu-se não só à possibilidade de serem retirados dados com significado para o objetivo proposto, bem como a relativa facilidade em efetuar a instalação do aparelho de medição de uma forma rápida e eficaz devido à existência de uma válvula de descarga, tal como se pode observar na Figura 3.



Figura 3. Instalação de um “datalogger” na conduta de ligação ao RAC.

É possível quantificar diferenças de pressão entre a secção de medição na conduta de compressão e a nova secção de medição.

Para tal, admite-se que a pressão na compressão é igual à pressão na secção de ligação da conduta principal com a conduta de ligação RAC, pois as perdas de carga contínuas na conduta principal entre a bomba e o RAC, considerando que se escoia o caudal máximo de bombagem, são desprezáveis comparativamente às perdas na ligação, tal como visto no Quadro 3.

Atendendo aos valores das perdas de carga médias na ligação apresentadas no quadro anterior, a conduta em DN80 provoca uma perda de carga muito significativa para a gama de pressões existentes no sistema em causa.

Quadro 3. Perdas de carga reais totais na conduta de ligação ao RAC e perdas contínuas teóricas no trecho Bomba-secção de ligação.

Q (m ³ /h)	Perdas de Carga Reais médias na ligação (bar)	Perdas de carga contínuas teóricas entre a Bomba e a secção de ligação (bar)
650	7,6	0,003
600	7,1	0,003
550	6,0	0,003
500	5,3	0,002
450	4,5	0,002

Tal como referido anteriormente, foram analisadas duas situações diferentes no que se refere aos dados introduzidos no programa na ligação ao RAC.

No primeiro cenário, foram utilizados três valores para o coeficiente perda de carga localizada ($K_{loc1}=1$; $K_{loc2}=1,1$ e $K_{loc3}=2$) para atender à perda de carga localizada na curva de 90°, pois mesmo considerando valores de caudal muito elevados na conduta em DN300, os valores perdas de carga contínuas são pouco significativos.

Devido à falta de informação mais específica e detalhada, analisaram-se três hipóteses de possíveis valores de K_{loc} para se poder estudar, ainda que de forma mais qualitativa do que quantitativa, o comportamento teórico do RAC.

A análise no modelo mostrou-se ineficaz para todas as hipóteses, pois verificaram-se erros numéricos na resolução das equações de segundo grau das condições fronteira no grupo elevatório.

Esta constatação levou a que fosse experimentada uma nova hipótese, $K_{loc4}=0$, de forma a perceber se este erro se devia à perda de carga localizada, ou ao diâmetro utilizado como diâmetro de ligação e tubeira.

Os resultados obtidos para esta hipótese foram análogos aos anteriores, o que se conclui que o erro se deve à aplicação da conduta em DN80, considerando-se assim o cenário 1) como inapropriado ao problema, pois a consideração deste diâmetro, o caudal do RAC no modelo teórico a partir dos 7,8 s apresenta valores imaginários, provocando o problema numérico referido acima.

Assim sendo, para se proceder à análise do modelo teórico no cenário 2) foi necessário quantificar um valor para K_{loc} , mas agora que traduzisse um comportamento satisfatório da conduta em DN80.

Numa análise inicial a quantificação destes coeficiente, teve como base a análise de valores empíricos expostos por Idel’Cik (1979) e Lencastre (1996) que se verificou insatisfatória.

Esta situação deve-se ao facto dos referidos autores considerarem valores de velocidades baixos comparativamente às velocidades que possivelmente circulam no trecho em estudo e consequentemente, os valores máximos de K_{Loc} estimados são próximos da unidade.

Com intuito de justificar os elevados valores de velocidade na conduta anteriormente considerados, realizou-se uma análise que consistiu no estudo de caudais teóricos na secção do RAC nos instantes em que se verifica o choque no cenário 2), isto é, considerando a ligação em DN300 e uma perda de carga localizada de 1,1.

No caso de se considerarem os caudais obtidos na conduta em DN80, constatou-se que as velocidades resultantes desses caudais atingiriam valores máximos na ordem dos 45 m/s, tal como ilustrado na Figura 4.

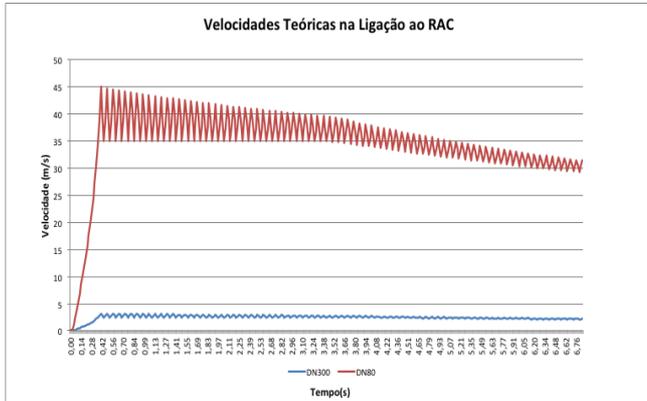


Figura 4. Velocidades teóricas no RAC.

Apenas se consideraram os instantes iniciais, pois é durante esse período que se verificam os maiores caudais na conduta de ligação para anular as sobrepressões na conduta principal.

Com os dados adicionais obtidos neste segundo ato experimental, tentou relacionar-se a perda de carga total medida na ligação com um coeficiente de perda de carga equivalente (k_{eq}).

Recorde-se que a localização do novo medidor instalado permite a observação da variações de pressão ao longo da conduta de ligação de menor diâmetro.

Para tal, estabeleceu-se uma relação entre a perda de carga na conduta com o caudal que se escoo na mesma.

Devido à falta de dados relacionada sobretudo com a velocidade ou caudal, considerou-se que o caudal seria o escoado na conduta principal, admitindo assim que toda a coluna líquida a montante da secção do RAC teóricos, isto é, a evolução das pressões é igual.

Para os dois casos o valor de pressões mínimas foi de 6,99 bar e pressões máximas próximas de 11,39 bar.

Com intuito de avaliar o erro inerente a essas considerações, efetuou-se também essa relação para caudais e perdas de carga teóricos (contínuas apenas), de forma a estabelecer uma comparação dos valores do coeficiente de perda de carga global (K_G) e equivalente (k_{eq}) nas diferentes situações (real e teórico).

A relação estabelecida é traduzida pela eq. [1]:

$$\Delta H_1 = K_G Q^2 \tag{1}$$

considerando que:

$$K_G = \frac{K_{eq}}{2gS^2} \Leftrightarrow k_{eq} = 2gS^2 K_G \tag{2}$$

em que ΔH_1 representa a perda de carga observada experimentalmente (m), K_G o coeficiente de perda de carga global, Q o Caudal (m^3/s), K_{eq} o coeficiente de perda de carga equivalente; g a aceleração da gravidade (m/s^2) e S a secção (m^2).

No que concerne à perda de carga contínua teórica referida anteriormente foi obtida pela conhecida expressão:

$$\Delta H_2 = JL \tag{3}$$

em que ΔH_2 representa a perda de carga contínua teórica (m), J a perda de carga unitária (m/m) e L o comprimento da conduta de ligação (m).

A correlação obtida para os dois casos foi satisfatória, apresentando valores de coeficiente de correlação r^2 superiores a 0.8.

Tal como esperado, os valores obtidos para K_G e k_{eq} apresentados no Quadro 4 são diferentes, uma vez que na correlação de valores teóricos não se consideraram perdas de carga localizadas e na correlação de valores práticos consideram-se caudais que na realidade não circulam na conduta de ligação.

Quadro 4. Coeficientes de perda de carga globais e equivalentes.

Coeficientes de perda de carga globais e equivalentes		
Coeficientes	K_G	k_{eq}
Dados Teóricos	2157	1,1
Dados Reais	2577,2	1,3

Os diferentes k_{eq} introduzidos no modelo teórico não produziram qualquer efeito nos resultados teóricos, isto é, a evolução das pressões é igual.

Para os dois casos o valor de pressões mínimas foi de 6,99 bar e pressões máximas próximas de 11,39 bar.



Figura 5. Comparação modelo teórico e dados experimentais do ensaio 5.

Pela observação da Figura 6, que compara as pressões obtidas no modelo e nas medições, verifica-se que no ensaio testado (ensaio 5) os valores de pressão máxima são muito próximos (1 bar), o que já não acontece em termos de pressões mínimas (superior a 3 bar).

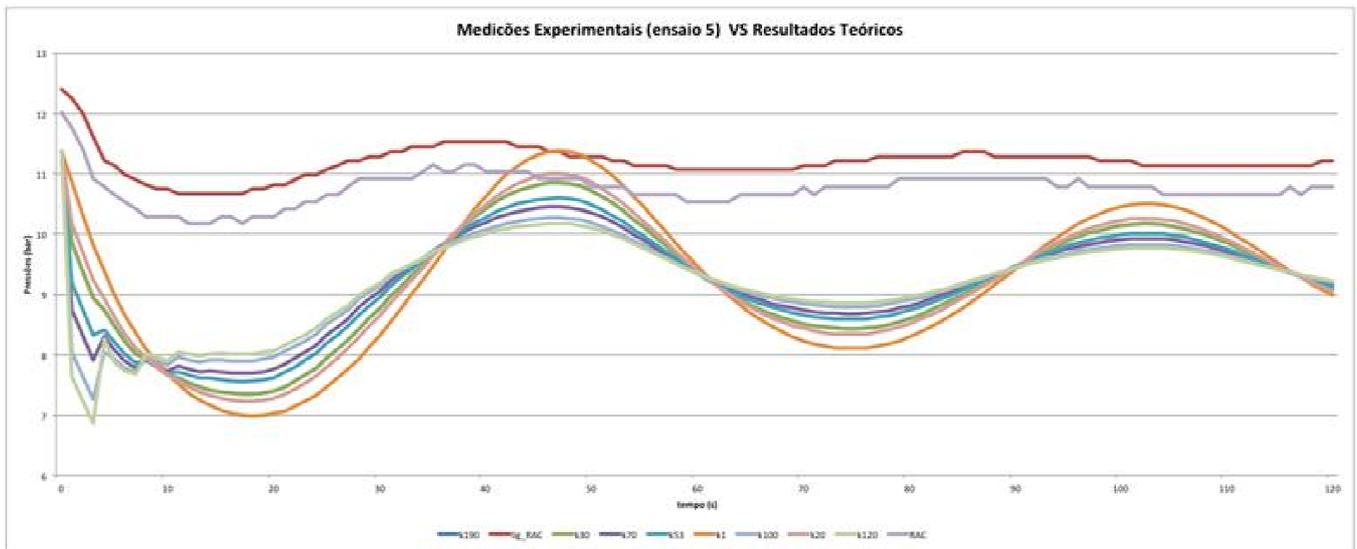


Figura 6. Pressões para vários k_{eq} no modelo teórico e dados experimentais do ensaio.

A diferença de pressões máximas é explicada pelo facto dos ensaios se realizarem com caudais de bombagem de 650 m³/h (altura manométrica de 140 m) e o modelo teórico funcionar com caudais no ponto de funcionamento, isto é, cerca de 700 m³/h (altura manométrica de 129,2 m). Em termos de pressões mínimas, uma diferença tão significativa não é só justificada pela razão anteriormente enunciada, mas também pelo facto de o coeficiente de perda de carga estimado não conseguir traduzir os efeitos da tubagem de ligação. Consequentemente, o tempo de estabilização de pressões é mais curto na realidade do que no modelo teórico, com amplitudes de variações muito mais baixas.

Dos resultados obtidos deduz-se que a perda de carga na conduta de ligação tem uma grande variação de energia resultante da variação da velocidade e que não foi possível quantificar. Esta dinâmica nas pressões demonstrou ser impossível de retratar no modelo através de um único coeficiente k_{eq} , pois este deveria ser diferente em cada instante Δt do método das características. Este raciocínio pode ser justificado pela uso de vários coeficientes no modelo teórico, isto é, realizando um estudo de sensibilidade do programa à variação de k_{eq} . Se forem utilizados vários k_{eq} no modelo, pela observação da Figura 5, deduz-se que o modelo apresenta mais semelhanças aos resultados medidos experimentalmente quando se consideram diferentes coeficientes de perda de carga em diferentes instantes.

Para os vários k_{eq} utilizados, conclui-se que os valores que teoricamente melhor representam o comportamento da conduta são 1 e 120 nos diferentes instantes do fenómeno.

Nos instantes iniciais do registo observaram-se perturbações bruscas nas pressões, atingindo valores máximos na ordem dos 7 bar. Numa análise mais pormenorizada desse intervalo de tempo, constata-se que para valores tão elevados do coeficiente de perda de carga, a variação das pressões se assemelha às pressões na conduta de compressão, o que significa que o RAC deixou de ser funcional, pois tal perda de carga na ligação limita ou até impede na totalidade a circulação na conduta de ligação.

4. Conclusões

O desenvolvimento do presente estudo permitiu concluir que a especificidade e a complexidade que ocorrem na modelação do funcionamento de um reservatório de ar comprimido em que a sua ligação à conduta principal é realizada em trechos de diâmetros muito diferentes, como acontece em grande parte das aplicações práticas sem, contudo, este efeito ser devidamente considerado.

Na análise em modelo teórico, a transposição do caso de estudo para o modelo, permitiu constatar bastantes incompatibilidades, causadas, principalmente, pelos dados a inserir ou “inputs” requeridos e que se traduziram em resultados teóricos algo diferentes dos expectados.

As incompatibilidades surgiram na ligação da conduta principal ao RAC, uma vez que a conduta estudada apresenta uma solução construtiva que diverge das soluções práticas normalmente adotadas e para as quais os métodos e modelos teóricos são habitualmente desenvolvidos e adaptados.

Apesar das diferenças entres os resultados do modelo e dos resultados correspondentes das experiências efetuadas, os métodos utilizados para estimar um possível valor para um coeficiente de perda de carga localizada equivalente e que simule cada um dos trechos da conduta de ligação, demonstraram a possibilidade de se apresentar soluções que permitiram retirar conclusões válidas neste trabalho.

O estudo desenvolvido permitiu evidenciar que o conhecimento das velocidades a cada instante na conduta principal e na conduta de ligação ao RAC são essenciais para uma análise detalhada do funcionamento do RAC.

A impossibilidade prática e momentânea referente ao presente trabalho em fazer tais medições, limitou a possibilidade de estimar valores mais rigorosos das perdas de carga, mais especificamente na ligação ao RAC.

A análise e o estudo das perdas de carga nessa conduta de ligação entre conduta principal e o RAC, permitiram concluir que:

- No caso da conduta de ligação composta por dois trechos de diferentes diâmetros, o valor do coeficiente de perda de carga localizado equivalente que simula o comportamento de um desses trechos não deverá ser constante no tempo;
- É necessário um estudo mais detalhado do desenvolvimento das perdas de carga durante a ocorrência do fenómeno do choque hidráulico através do conhecimento das velocidades na conduta de ligação;
- Inadaptação dos valores teóricos de coeficientes de perda de carga consultados na bibliografia da especialidade, uma vez que apenas visa velocidades baixas comparativamente às estimadas na conduta em causa;
- A conduta de ligação desempenha um papel essencial no funcionamento eficaz de um RAC;
- Limitações do modelo teórico ao modo como são abordadas as características da ligação.

A discrepância entre os valores medidos e os valores calculados pelo programa de cálculo, pode ser explicada também pela lei de paragem dos grupos elevatórios. Esta pode não estar a ser bem reproduzida no modelo, uma vez que na realidade existe uma válvula de seccionamento a jusante desta, que poderá reduzir o tempo de paragem, fator que a lei de paragem teórica da bomba não tem em consideração. Este facto influencia o tempo de manobra da bomba, o que interfere diretamente com a sobreposição das ondas de pressão e, conseqüentemente, com os valores de pressão obtidos.

Apesar de todas as dificuldades na modelação do RAC, verificou-se que este reduz de forma eficaz as subpressões e que durante as experiências realizadas de choque hidráulico se verificaram valores de pressões satisfatórios nos pontos de medição, atendendo às condições próprias do seu traçado. No entanto, com a introdução de um novo equipamento de medição no segundo teste experimental efetuado, verificou-se que a conduta em DN80 fica sujeita a sobrepressões e velocidades excessivas e muito gravosas que poderão comprometer a sua integridade.

Assim sendo, conclui-se que a solução adotada e em exploração, não é a mais adequada no caso concreto do RAC de Barradas, uma vez que a contração imposta pela conduta de DN80 dificulta a passagem de caudal para a conduta principal, atenuando assim de forma menos eficaz as subpressões.

De notar que esta conduta desempenha o “papel” de tubeira, pelo que deve facilitar a passagem da água em direção à conduta principal e dificultar no sentido oposto. Contudo, o que se constatou foi que o efeito desta contração contradiz esse princípio de funcionamento. Esse aspeto é facilmente perceptível pelo facto de no momento que a água inicia o movimento do RAC para a conduta principal devido às sobrepressões nesta, a velocidade apresenta os valores mais elevados, logo as perdas de carga tanto localizadas como contínuas no trecho em DN80 são muito significativas, tal como demonstrado nos resultados expostos no capítulo anterior.

O funcionamento inadequado desta conduta de ligação cria eventuais incompatibilidades no escoamento unidirecional na conduta, aquando da ocorrência do choque hidráulico, pois verifica-se que nesses instantes a pressão na ligação é superior à pressão no RAC, quando deveria ser inferior devido às diferenças de cota entre os medidores.

Desta forma, a regulamentação sobre este dispositivo deveria incidir também no modo como se realiza a ligação ao RAC, que em última análise deverá ser considerado como um equipamento sob pressão.

Ou seja, conclui-se que a implantação do RAC exige vários cuidados e deve ser analisado em conjunto com todos os equipamentos a ele ligados, pois em muitos casos o problema poderá não estar no reservatório propriamente dito, mas sim nos equipamentos associados, que em caso de mau funcionamento poderão acarretar vários problemas, comprometendo a segurança da conduta, do ambiente envolvente e principalmente de pessoas.

Agradecimentos

À Águas do Noroeste, S.A., nas pessoas dos seus colaboradores Eng^a Cristiana Barbosa, Eng.^o Jorge Lopes, Eng.^o Paulo Rego, Sr. Rui Oliveira e Sr. Pedro Barbosa, pela disponibilidade e possibilidade em utilizar as infraestruturas em causa e pela execução das diversas tarefas necessárias para a elaboração da componente prática do presente estudo.

Referências

- Idel'cik, I. (1979). *Memento des Pertes de Charge*. Eyrolles, Paris.
- Lencastre, A. (1996). *Hidráulica Geral*, Lisboa.
- Valente, J. (2008). *Modelação Hidráulica do Comportamento de uma Fuga de Água*. Dissertação de Mestrado, FEUP, Porto