

# REVISTA AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:  
Investigación, desarrollo y práctica.

## EFEITO DE FATORES GEOMÉTRICOS E HIDRÁULICOS SOBRE A VAZÃO PERDIDA E O EXPOENTE DE VAZAMENTO EM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

\*Dhiego Okumoto Macedo N<sup>1</sup>  
Paulo Alves<sup>2</sup>  
Fábio Veríssimo Gonçalves<sup>3</sup>  
Carlos Nobuyoshi Ide<sup>3</sup>  
Johannes Gerson Janzen<sup>3</sup>

### EFFECT OF GEOMETRIC AND HYDRAULIC FACTORS ON LEAKAGE FLOW AND LEAKAGE EXPONENT IN A WATER DISTRIBUTION SYSTEM

Recibido el 8 de marzo de 2017; Aceptado el 21 de febrero de 2018

#### Abstract

*This paper modeled a real water distribution system (WDS) with a large number of randomly distributed leaks to determine whether their combined behavior can produce the range of leakage flow rate percentage and system leakage exponents found in field studies. The pressure-leakage relation of individual leaks was modeled with the FAVAD equation that assumes a linear relationship between leak area and pressure, known to be valid for elastically deforming leaks. The characteristics of individual leaks and number of leaks were determined based on current best understanding of leakages in WDSs. The effect of the area and the amount of background leaks, the area of potentially detectable leaks, the pressure load and the discharge coefficient on the leakage flow rate and the leakage exponent (N) in a WDS was studied using factorial design. The results show that the five most relevant factors on the leakage flowrate in a WDS, in decreasing order, were the area of potentially detectable leaks, the pressure load, the interaction between the area of potentially detectable leaks and the pressure load, the discharge coefficient, the interaction between the area of potentially detectable and the discharge coefficient and the interaction between pressure load and the discharge coefficient. It was verified that the FAVAD equation could explain the values of leakage exponents found in real WDSs. In a sequence of diminishing relevance, the significant factors, or the combination of them, on the leakage exponent were the area of potentially detectable leakage, the number of background leaks and the interaction between the area potentially detectable leaks and the area of background leaks. Finally, we present some practical applications to WDSs.*

**Keywords:** leakage area; factorial design; computational modelling; FAVAD equation; EPANET.

<sup>1</sup> Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais, Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Brasil.

<sup>1</sup> Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Cincinnati.

<sup>1</sup> Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia, Universidade Federal de Mato Grosso do Sul.

\*Autor correspondente: Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia, Universidade Federal de Mato Grosso do Sul. Av. Costa e Silva s/n-Universitário, Campo Grande, Mato Grosso do Sul. 79070-900. Brasil. Email: [dhiego.macedo@gmail.com](mailto:dhiego.macedo@gmail.com)

## Resumo

Este artigo modela um sistema de distribuição de água (SDA) real com um grande número de vazamentos distribuídos aleatoriamente para determinar se o seu comportamento combinado pode produzir o intervalo de valores da porcentagem de vazão perdida e de expoentes de vazamento do sistema encontrados em estudos de campo. A relação pressão-vazão dos vazamentos individuais foi modelada com a equação de FAVAD que assume uma relação linear entre a área do vazamento e pressão, conhecida por ser válida para vazamentos que se deformam elasticamente. As características dos vazamentos individuais e do número de vazamentos foi determinada baseada no melhor entendimento atual de vazamentos em SDAs. Foi estudado o efeito da área e da quantidade dos vazamentos não-visíveis, da área dos vazamentos potencialmente detectáveis, da carga de pressão e do coeficiente de descarga sobre a vazão perdida e o expoente de vazamento (N) usando planejamento fatorial. Os resultados mostram que os cinco fatores mais relevantes sobre a vazão perdida pelo SDA em ordem decrescente foram a área de vazamentos potencialmente detectáveis, a carga de pressão, a interação entre área de vazamentos potencialmente detectáveis e carga de pressão, o coeficiente de descarga, a interação entre a área de potencialmente detectáveis e o coeficiente de descarga e a interação entre carga de pressão e coeficiente de descarga. Foi verificado que a equação de FAVAD consegue explicar os valores dos expoentes de vazamento encontrados em SDAs reais. Numa sequência de relevância decrescente os fatores significantes ou a combinação deles sobre o expoente de vazamento foram a área de vazamento potencialmente detectável, o número de vazamentos não-visíveis e a interação entre a área vazamentos potencialmente detectáveis e a área de vazamentos não-visíveis. Finalmente, nós apresentamos algumas aplicações práticas a SDAs.

**Palavras chave:** área de vazamento; planejamento fatorial; modelagem computacional; FAVAD; EPANET.

## Introdução

A associação entre a vazão perdida através de um vazamento individual presente em uma tubulação e a vazão perdida de um Sistema de Distribuição de Água (SDA) é relevante, pois permite aplicar o conhecimento sobre a vazão de vazamentos individuais analisados em laboratório, escala local, para sistemas reais contendo diversos vazamentos, em uma escala global (Ferrante *et al.*, 2104). Em escala local, a relação entre a vazão através do vazamento,  $q$ , versus a carga de pressão da tubulação,  $h$ , é denominada FAVAD (*Fixed and Variable Area Discharge*) sendo descrita pela Eq. (1) (May, 1994; Greyvenstein e Van Zyl, 2007; Cassa *et al.*, 2010; Van Zyl e Cassa, 2014):

$$q = C_d(2g)^{0.5}(A_0h^{0.5} + mh^{1.5}) \quad \text{Eq. (1)}$$

onde

$C_d$ : Coeficiente de descarga

$A_0$ : área inicial (sob pressão zero)

$g$ : aceleração da gravidade

$m$ : declividade carga de pressão-área.

O primeiro termo da Eq. (1) descreve a vazão através da área inicial do vazamento, enquanto que o segundo termo descreve a vazão através da parte expandida do vazamento.

Embora a Eq. (1) faça a previsão da vazão através de um vazamento simples em uma escala local, a vazão perdida em escala global  $Q$ , isto é, o somatório das vazões perdidas através dos diversos vazamentos locais em um SDA, é usualmente estimada através da “vazão mínima noturna” e da Eq. (2):

$$Q = CH^N \quad \text{Eq (2)}$$

onde

$C$ : Coeficiente de vazamento

$N$ : Expoente de vazamento

$H$ : carga de pressão característica do distrito ou do SDA analisado.

O expoente de vazamento varia tipicamente entre 0.5 e 1.5 (Schwaller e Van Zyl, 2015). Schwaller e Van Zyl (2015) mostraram que o efeito combinado de um grande número de vazamentos descritos pela Eq. (1) e distribuídos de forma aleatória em um SDA é capaz de produzir expoentes de vazamento  $N$ , obtidos a partir da Eq. (2), com valores semelhantes aos encontrados em estudos de campo.

Os autores ainda mostraram que os fatores que produzem o maior efeito sobre  $N$  são  $H$ , a área total inicial de vazamentos no sistema e o intervalo de pressão estática do sistema. Entretanto, o estudo de Schwaller e Van Zyl (2015) e outros realizados na área (Piller & Van Zyl, 2014; Schwaller & Van Zyl, 2014; Ferrante et al., 2013) possuem duas limitações. A primeira limitação é que eles não foram realizados em SDAs reais ou não consideraram fatores relevantes de SDA reais tais como tais como a declividade e a demanda de água variável ao longo do dia.

A segunda limitação é que os autores utilizaram para o planejamento experimental a estratégia de variação de um fator de cada vez. Nessa estratégia, fatores como o número de vazamentos e coeficiente de descarga são alterados um a um, mantendo os demais fatores constantes. Entretanto, uma investigação minuciosa dos efeitos dos fatores, juntamente com o efeito de suas interações, é desejável para uma melhor compreensão sobre como vazamentos por fissuras em tubulações de distribuição de água influenciam a vazão perdida e o expoente de vazamento em SDA. Por exemplo, é possível que  $C_d$  não produza um efeito principal sobre  $Q$  ou  $N$ , mas que o seu efeito dependa dos níveis de outro fator, tal como  $H$ . Se este for o caso, então o conhecimento da interação entre  $C_d$  e  $H$  é mais útil que o conhecimento do efeito principal de  $C_d$ . Uma interação significativa entre fatores pode mascarar a significância de um efeito principal (Montgomery e Runger, 2003). O planejamento fatorial é a única forma de descobrir essas interações entre fatores e a importância relativa de todos os fatores simultaneamente com a menor quantidade de experimentos.

Considerando essas duas limitações, o objetivo deste trabalho foi determinar o efeito da área e da quantidade dos vazamentos não visíveis, da área dos vazamentos potencialmente detectáveis, da carga de pressão e do coeficiente de descarga sobre  $Q$  e  $N$  usando planejamento fatorial num

SDA real. Também foi analisado se o conjunto de vazamentos individuais descritos pela Eq. (1) é capaz de reproduzir os valores de  $N$ , obtidos em setores de redes de distribuição a partir de campanhas de vazão mínima noturna expressos na forma da Eq. (2).

### Material e método

O trabalho foi desenvolvido utilizando como base o sistema de distribuição de água do bairro Barra da Lagoa, Florianópolis/SC, Brasil. A rede adotada apresenta um comprimento total de aproximadamente 30.7 km, com 2211 ligações, sendo as tubulações predominantemente em PVC (Policloreto de polivinila) e os diâmetros variando entre 50 mm a 200 mm. A área de estudo localiza-se em uma região litorânea, possuindo elevada variação na altimetria, em torno de 35 m.

Utilizou-se um planejamento fatorial  $2^5$  para investigar o efeito da área ( $A_{VNV}$ ) e da quantidade dos vazamentos não-visíveis ( $N_{VNV}$ ), da área dos vazamentos potencialmente detectáveis ( $A_{PD}$ ), da carga de pressão ( $H$ ) e do coeficiente de descarga ( $C_d$ ) sobre a vazão de vazamento do sistema,  $Q$  (Tabela 1). Para estimar os valores dos níveis baixos e altos de cada um desses fatores foi seguido o procedimento apresentado por Schwaller e Van Zyl (2015).

Os vazamentos não-visíveis são muito pequenos ( $q < 250$  L/h, isto é, área menor que aproximadamente  $3,4 \text{ mm}^2$  para uma carga de pressão de 50 metros de coluna de água - mca) (Hamilton *et al.*, 2012). Os níveis, baixo e alto, de quantidade de vazamentos não-visíveis foram, respectivamente, 50 e 75, resultando em aproximadamente 1 vazamento a cada 600 m lineares de rede para o nível mínimo e 1 vazamento a cada 400 m para o nível máximo. A distribuição espacial dos vazamentos não-visíveis no sistema foi realizada de forma aleatória tendo como pressuposto que esses vazamentos apresentam maior probabilidade de ocorrerem em ramais e ligações de serviço. Mais detalhes da distribuição dos vazamentos podem ser encontrados em Macedo (2016).

O nível baixo de área total média de vazamentos não-visíveis foi igual a  $46 \text{ mm}^2$  e o nível alto de área total média de vazamentos não-visíveis foi igual a  $55 \text{ mm}^2$ . Para determinação da ordem de grandeza da  $A_{VNV}$  foram usadas as fórmulas de *Unavoidable Background Leakage* (UBL) propostas pela *International Water Association* (IWA) (Lambert, 2000) de 20 L/h/km de perda d'água em tubulações da rede e 1.25 L/h/ligação de serviço (da rede para o consumidor) de perda d'água a uma pressão de 50 mca.

A área média individual dos vazamentos foi obtida através da relação área total/quantidade de vazamentos. A área dos vazamentos individuais seguiu uma distribuição normal com média igual a área total/quantidade de vazamentos e coeficiente de variação de 25%.

**Tabela 1.** Matriz de planejamento fatorial  $2^5$ , níveis das variáveis independentes e resposta observada.

Cenário	$A_{VNV}$ (mm <sup>2</sup> )	$A_{PD}$ (mm <sup>2</sup> )	H (mca)	$C_d$	$N_{VNV}$	Q (L/s)	% perda de água no sistema
1	55	115.9	80	0.575	75	8.338	47.794
2	55	13.6	80	0.725	75	1.884	17.573
3	46	13.6	80	0.575	75	1.314	12.992
4	55	115.9	40	0.575	75	4.075	31.293
5	46	13.6	40	0.725	75	1.111	11.254
6	46	13.6	80	0.725	75	1.650	15.749
7	55	115.9	40	0.725	75	5.137	36.348
8	55	13.6	40	0.575	75	1.011	10.363
9	55	13.6	80	0.575	75	1.501	14.554
10	55	13.6	40	0.725	75	1.269	12.642
11	46	115.9	80	0.725	75	10.398	53.167
12	46	115.9	40	0.575	75	3.796	29.819
13	46	13.6	40	0.575	75	0.885	9.196
14	55	115.9	80	0.725	75	10.447	53.287
15	46	115.9	80	0.575	75	7.810	46.199
16	46	115.9	40	0.725	75	5.061	36.008
17	55	115.9	80	0.575	50	7.959	46.664
18	55	13.6	80	0.725	50	1.851	17.327
19	46	13.6	80	0.575	50	1.307	12.942
20	55	115.9	40	0.575	50	3.886	30.306
21	46	13.6	40	0.725	50	1.113	11.311
22	46	13.6	80	0.725	50	1.663	15.902
23	55	115.9	40	0.725	50	4.989	35.695
24	55	13.6	40	0.575	50	0.990	10.181
25	55	13.6	80	0.575	50	1.483	14.415
26	55	13.6	40	0.725	50	1.234	12.353
27	46	115.9	80	0.725	50	10.009	52.247
28	46	115.9	40	0.575	50	3.778	29.730
29	46	13.6	40	0.575	50	0.875	9.113
30	55	115.9	80	0.725	50	10.196	52.697
31	46	115.9	80	0.575	50	7.797	46.167
32	46	115.9	40	0.725	50	4.864	35.127

Os vazamentos potencialmente detectáveis são maiores e podem usualmente serem detectáveis através de programas de detecção de vazamentos ( $q > 250$  L/h, isto é, área maior que aproximadamente  $3.4$  mm<sup>2</sup> para uma carga de pressão de 50 mca) (Hamilton *et al.*, 2012).

Os níveis baixo e alto de área total média de vazamentos potencialmente detectáveis foram iguais a, respectivamente, 13.6 mm<sup>2</sup> e 115.9 mm<sup>2</sup>. Para determinação da ordem de grandeza da área e da quantidade dos vazamentos potencialmente detectáveis foram usadas as fórmulas propostas pela *International Water Association* (IWA) (Lambert, 2000). No nível baixo, os dois vazamentos potencialmente detectáveis foram alocados em linhas de serviço com  $A_0 = 6.8$  mm<sup>2</sup>. No nível alto, 5 vazamentos com área de 6.8 mm<sup>2</sup> foram alocados em linhas de serviço e 1 vazamento com área de 81.9 mm<sup>2</sup> foi alocado na tubulação principal.

Para a carga de pressão, foram adotados os níveis de 40 e 80 mca. O nível de 40 mca foi adotado para evitar a ocorrência de pressões negativas nos nós e o valor de 80 mca foi adotado buscando-se obter cargas de pressão compatíveis com aquelas observadas em diferentes países.

O coeficiente de descarga  $C_d$  foi modelado usando uma distribuição normal. A média dos coeficientes de descarga no nível baixo e nível alto foram, respectivamente, 0.575 e 0.725. Foi utilizado um coeficiente de variação de 5%.

O gradiente pressão-área  $m$  foi modelado através da função potencial para área inicial dos vazamentos Eq. (3) (Schwaller e Van Zyl, 2015):

$$m = 2 \cdot 10^6 \cdot A_0^{2.91} \quad \text{Eq. (3)}$$

O software EPANET, utilizado neste estudo, calcula a vazão através de vazamentos utilizando a equação (2). Já que o objetivo deste estudo foi investigar como a equação de FAVAD influencia a vazão perdida e o expoente de vazamento do SDA, então a equação (2) foi substituída pela equação (1) no software EPANET.

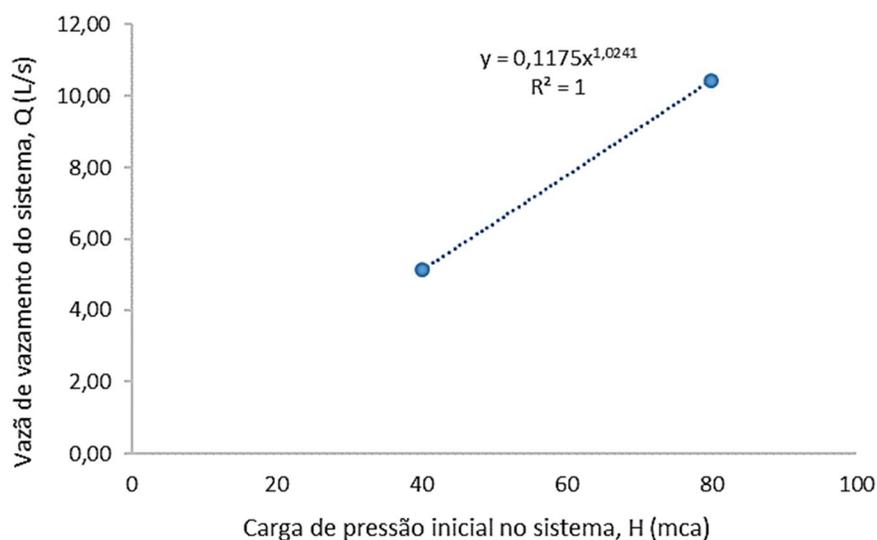
Os coeficientes de variação de consumo de água ao longo do dia utilizados nas simulações foram obtidos através dos dados de monitoramento de vazão disponibilizados pela companhia de saneamento do estado de Santa Catarina, Brasil.

Para investigar o efeito da área ( $A_{VNV}$ ) e da quantidade dos vazamentos não-visíveis ( $N_{VNV}$ ), da área dos vazamentos potencialmente detectáveis ( $A_{PD}$ ), e do coeficiente de descarga ( $C_d$ ) sobre o expoente de vazamento  $N$  foi usado um planejamento fatorial 2<sup>4</sup> (Tabela 2).

Para obtenção do valor de  $N$  foram realizados gráficos  $Q$  versus  $H$ , tais como na Fig. 1, e ajustada uma equação igual a Eq. (2).

**Tabela 2.** Matriz de planejamento fatorial  $2^4$ , níveis das variáveis independentes e resposta observada.

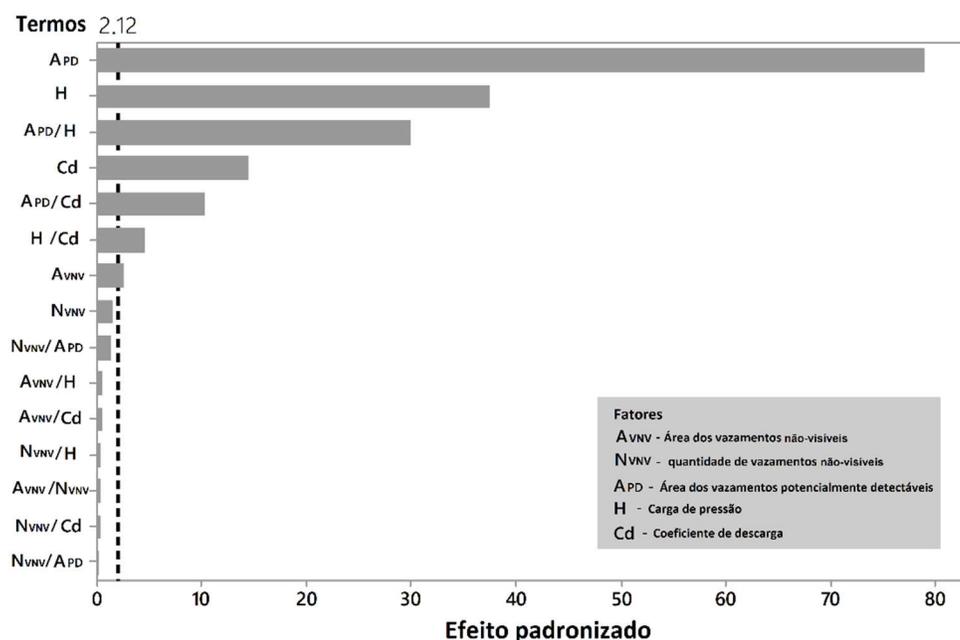
$A_{VNV}$ (mm <sup>2</sup> )	$A_{PD}$ (mm <sup>2</sup> )	$C_d$	$N_{VF}$	$N$
55	115.9	0.725	75	1.0241
55	115.9	0.725	50	1.0311
46	13.6	0.725	75	0.5706
46	13.6	0.725	50	0.5786
46	13.6	0.575	50	0.5786
46	13.6	0.575	75	0.5702
55	115.9	0.575	50	1.0344
55	115.9	0.575	75	1.0329
55	13.6	0.575	75	0.5694
55	13.6	0.575	50	0.5827
46	115.9	0.575	75	1.0408
46	115.9	0.575	50	1.0452
46	115.9	0.725	50	1.0411
46	115.9	0.725	75	1.0388
55	13.6	0.725	50	0.5847
55	13.6	0.725	75	0.5700



**Figura 1.** Q versus H para  $A_{VF} = 55$  mm<sup>2</sup>,  $A_{PD} = 115.9$  mm<sup>2</sup>,  $C_d = 0.725$ ,  $N_{VF} = 75$ .

## Resultados e Discussão

O gráfico Pareto da Figura 2 mostra os efeitos principais e suas interações sobre a vazão através do vazamento ( $Q$ ) em ordem de importância decrescente. A linha vertical no gráfico indica o valor mínimo a partir do qual os efeitos são estatisticamente significativos para um nível de confiança de 95%.



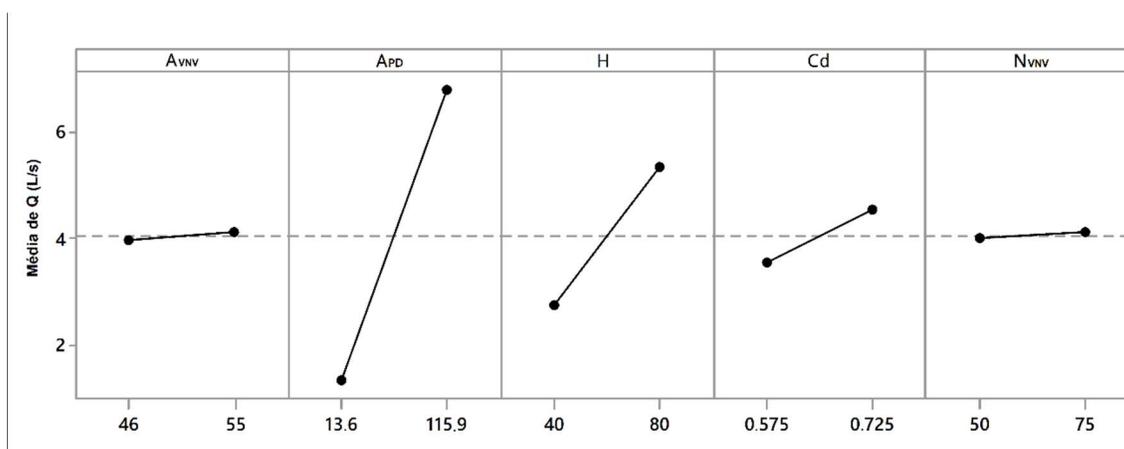
**Figura 2.** Gráfico de Pareto dos efeitos do planejamento fatorial  $2^5$  sobre  $Q$ . A linha vertical indica o efeito mínimo estatisticamente significativo para um nível de confiança de 95%.

Os efeitos principais e sua interação são a diferença entre a resposta média no nível alto e baixo, respectivamente, das variáveis independentes ou de suas interações (Montgomery e Runger, 2003). Numa sequência de relevância decrescente, os fatores significativos ou a combinação deles são:  $A_{PD} > H > A_{PD} \cdot H > C_d > A_{PD} \cdot C_d > H \cdot C_d > A_{VNV} > N_{VNV} > A_{PD} \cdot N_{VNV}$ .

Com relação aos efeitos significativos principais (Figura 3), quando  $A_{PD}$  aumenta, a vazão perdida também aumenta. A mudança na carga de pressão do nível baixo para o alto aumenta a vazão perdida. A vazão perdida aumenta com o aumento de  $C_d$ . O aumento de  $A_{BL}$  incrementa  $Q$ ; a mudança de  $N_{VF}$  de baixo para alto aumenta a vazão perdida.

Com relação às interações (Figura 4), o efeito de  $H$  sobre a vazão perdida é muito maior para o nível alto da  $A_{PD}$  que para o nível baixo. Para  $m \ll 1$  (i.e.  $A_0 \ll 900 \text{ mm}^2$ ), o primeiro termo da Eq. 1 é dominante. Portanto, para  $A_{PD}$  pequeno, o segundo termo (que depende de  $H$ ) possui pouco

efeito sobre a vazão perdida, enquanto que para uma área grande  $A_{PD}$ , o segundo termo tem efeito maior sobre a vazão perdida. O efeito de  $C_d$  sobre a vazão perdida é maior para níveis elevados da  $A_{PD}$ . O aumento da vazão perdida devido ao aumento de  $H$  é elevado se  $C_d$  está no nível alto, mas apresenta-se menor quando  $C_d$  está no nível baixo. O efeito de aumentar  $A_{PD}$  depende do número de vazamentos não-visíveis  $N_{VNV}$ ; há um aumento menor da vazão perdida para  $N_{VNV} = 50$  que para  $N_{VNV} = 75$  quando  $A_{PD}$  é incrementado. A literatura fornece praticamente nenhuma informação com relação aos efeitos de interação entre fatores, uma vez que a maioria dos estudos mudou um fator de cada vez mantendo o restante constante.



**Figura 3.** Os efeitos principais de  $A_{VF}$ ,  $A_{PD}$ ,  $H$ ,  $C_d$ ,  $N_{VF}$  sobre  $Q$ . Todos fatores são estatisticamente significantes.

Os expoentes de vazamento  $N$  variaram entre 0.57 e 1.05 (Tabela 2), estando em boa concordância com os intervalos de estudos de campo, que aparecem em média em torno de 0.5 e 1.5 (Farley e Trow, 2003; Lambert, 2012; Schwaller e Van Zyl, 2015), indicando que o efeito combinado dos vazamentos individuais com deformação elástica pode de fato produzir o intervalo típico de expoentes de vazamento encontrados em estudos de campo. Numa sequência de relevância decrescente, os fatores significantes ou a combinação deles sobre  $N$  são:  $A_{PD} > N_{VF} > A_{VF} \cdot A_{PD}$  (Figura 5).

Quando  $A_{PD}$  aumenta, o expoente de vazamento também aumenta (Figura 6). Schwaller e Van Zyl (2015) também observaram que o aumento da área dos vazamentos potencialmente detectáveis aumenta desproporcionalmente a vazão perdida e, conseqüentemente, o expoente de vazamento. O aumento de  $N_{VF}$  diminui  $N$ , estando em concordância com os resultados obtidos por Schwaller e Van Zyl (2015). Finalmente, o efeito de  $A_{VF}$  sobre  $N$  depende do nível de  $A_{PD}$  (Figura 7); para um alto valor de  $A_{PD}$ , o aumento de  $A_{VF}$  diminui  $N$ , enquanto que para um baixo valor de  $A_{PD}$ , o aumento de  $A_{VF}$  aumenta  $N$ .

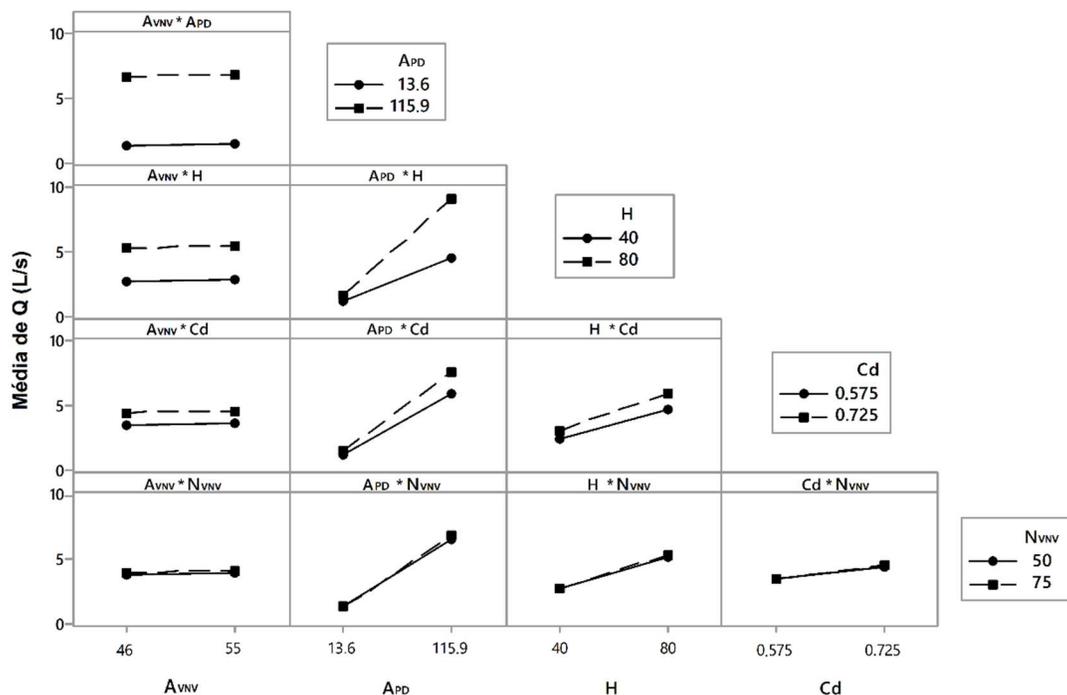


Figura 4. Os efeitos de interação  $Q$ .  $A_{PD} \cdot H$ ,  $A_{PD} \cdot Cd$ ,  $H \cdot Cd$ , e  $A_{PD} \cdot N_{VF}$  são estatisticamente significantes.

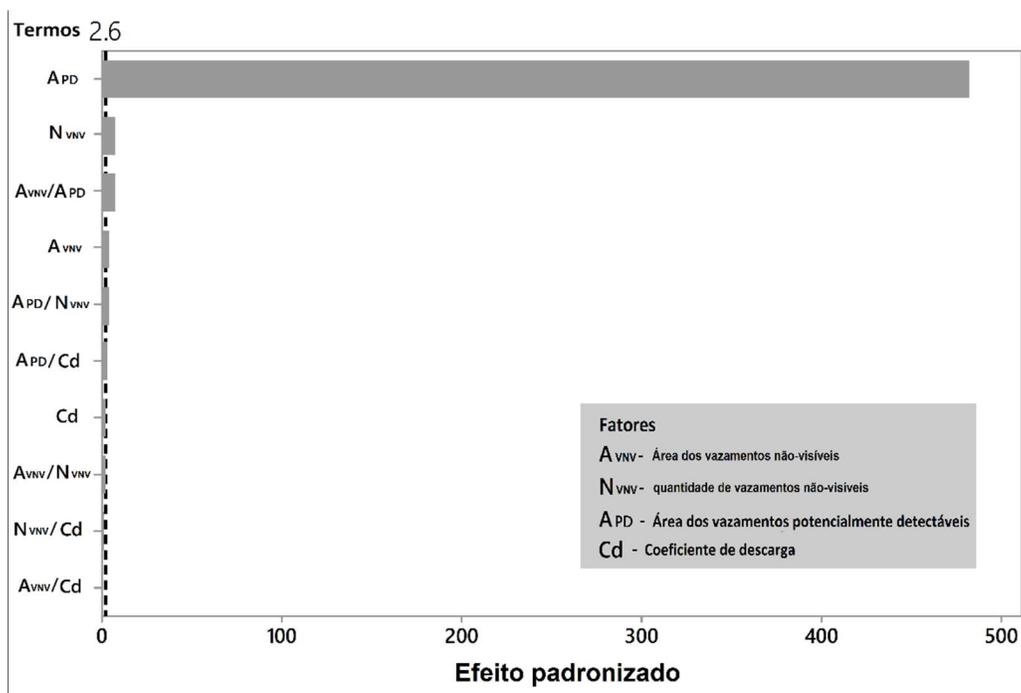


Figura 5. Gráfico de Pareto dos efeitos do planejamento fatorial  $2^4$  sobre  $N$ . A linha vertical no gráfico indica o efeito mínimo estatisticamente significativo para um nível de confiança de 95%.

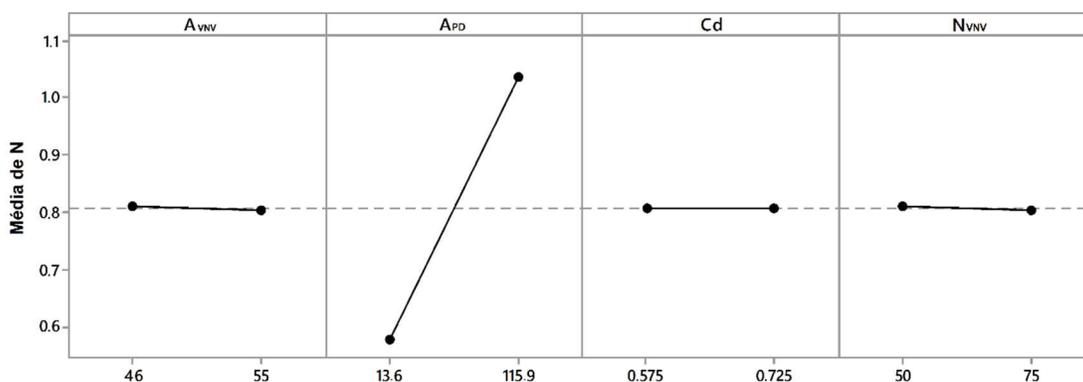


Figura 6. Os efeitos principais de  $A_{VF}$ ,  $A_{PD}$ ,  $Cd$  e  $N_{VF}$  sobre  $N$ .  $A_{PD}$  e  $N_{VF}$  são estatisticamente significantes.

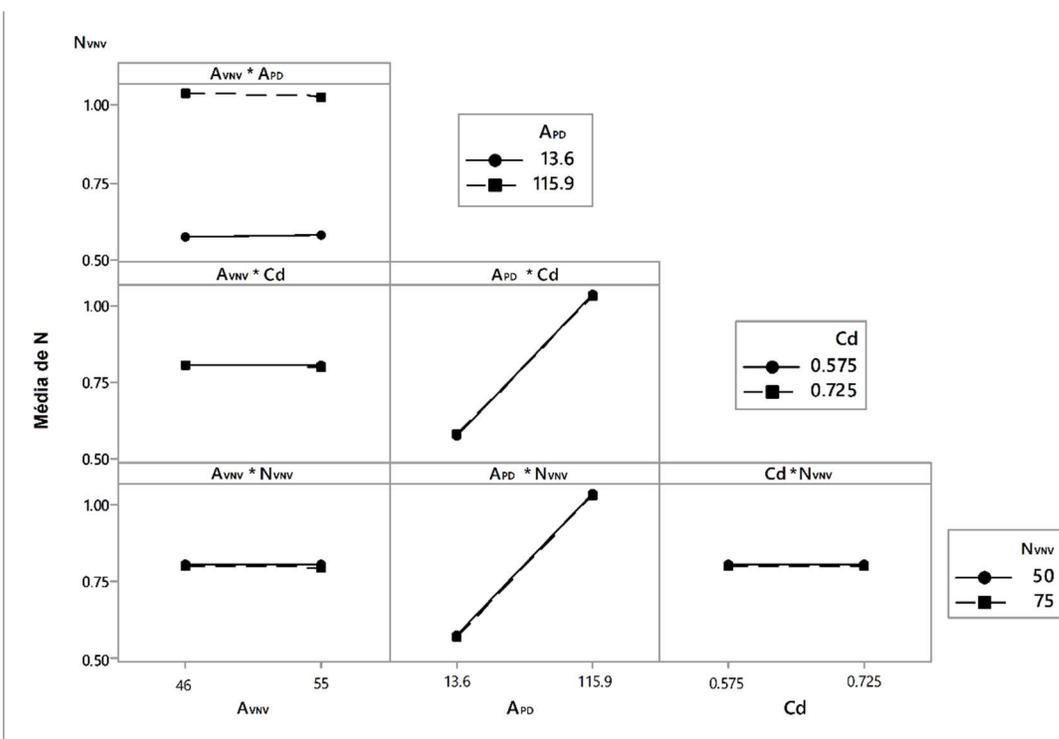


Figura 7. Os efeitos de interação de  $A_{VF}$ ,  $A_{PD}$ ,  $Cd$  e  $N_{VF}$  sobre  $N$ .  $A_{VF} * A_{PD}$  é estatisticamente significante.

Os resultados deste estudo possuem diversas implicações para a prática de SDA. Primeiro, a gestão de perdas de um SDA deveria focar principalmente na gestão dos vazamentos potencialmente detectáveis (através da substituição de tubulações) e da pressão (por exemplo, através de válvulas reguladoras de pressão). Segundo, a variação significativa do expoente do SDA

( $N$ ) indica a existência de vazamentos potencialmente detectáveis. Terceiro, como o valor do coeficiente de descarga  $C_d$  não pode ser gerido pelas empresas de saneamento, então, na inexistência de vazamentos detectáveis, os vazamentos não-visíveis deveriam ser controlados. Isto é, as empresas de saneamento deveriam utilizar alguma técnica para detecção e localização de vazamentos não-visíveis (ver, por exemplo, Romano, 2012) para a substituição das tubulações com fissuras de pequena área.

### Conclusão

O presente trabalho modelou um SDA real com vazamentos para investigar a aplicação da equação de FAVAD para caracterizar a relação pressão-vazão de um SDA. Os resultados mostraram que com a relação de FAVAD é possível explicar boa parte dos expoentes de vazamentos compreendidos entre 0.5 e 1.5 que usualmente são encontrados em campanhas em SDAs reais. Os fatores mais importantes para vazão perdida e o expoente de vazamento, e que podem ser geridos pela empresa de saneamento, são em ordem decrescente os vazamentos potencialmente detectáveis, a pressão e os vazamentos não-visíveis. Os vazamentos potencialmente detectáveis podem eventualmente serem descobertos através de mudanças no valor do expoente do SDA. A pressão pode ser gerida, por exemplo, através de válvulas reguladoras de pressão. Os vazamentos não-visíveis podem ser detectados e localizados através de técnicas pertinentes.

### Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo financiamento das pesquisas realizadas (Programa PROBRAL CAPES/DAAD n°. 17/2015) e pela bolsa de pós-graduação do primeiro autor; também à Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) (Chamada Pública MCT/FINEP CT-HIDRO 01/2010, instrumento contratual código no. 01.12.0063.00) pelo financiamento das pesquisas realizadas na Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS).

### Referências bibliográficas

- Cassa, A.M., Van Zyl, J.E., and Laubscher, R.F. (2010). A Numerical Investigation Into The Effect Of Pressure On Holes And Cracks In Water Supply Pipes. *Urban Water Journal*, **7**(2), 109–120. DOI: 10.1080/15730620903447613
- Macedo, D.O.(2016). *Modelagem de Vazamento em Rede de Distribuição de Água considerando o comportamento elástico das fissuras*. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-graduação em Tecnologias Ambiental, Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia, Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, 114pp.
- Farley, M., Trow, S. (2003). Losses in water distribution network. *International Water Association*, London.
- Ferrante, M., Brunone, B., Meniconi, S. (2015). The Relationship between Pressure and Leakage for a Single Leak and for a District with Leaks. *Water Resources Management*, **28**, 3761-3782. doi: 10.1007/s11269-014-0708-x
- Greyvenstein, B., Van Zyl, J.E. (2007). An experimental investigation into the pressure-leakage relationship of some failed water pipes. *Journal of Water Supply: Research and Technology-AQUA*, **56**(2). doi: 10.2166/aqua.2007.065
- Hamilton, S., Krywyj, D. (2012). The problem of leakage detection on large diameter mains. *Pipelines 2012: Innovations in Design, Construction, Operations and Maintenance – Doing More with Less*. 432-441. Manila, Philippines.

- Lambert, A. (2000). What do we know about pressure: Leakage relationship in distribution system? *International Water Association*, London.
- May, J. (1994) Pressure Dependent Leakage. *World Water and Environmental Engineering*, 10.
- Piller, O., Van Zyl, J.E. (2014). Incorporating the FAVAD Leakage Equation into Water Distribution System Analysis. *16th Conference on Water Distribution System Analysis*, 613-617.
- Schwaller, J., Van Zyl, J.E. (2015). Modeling the Pressure-Leakage Response of Water Distribution Systems Based on Individual Leak Behavior. *Journal of Hydraulic Engineering*, 141. doi: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000984.
- Van Zyl, J.E., Cassa, A.M. (2014). Modeling Elastically Deforming Leaks in Water Distribution Pipes. *Journal of Hydraulic Engineering*. 140:182-189. doi: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000813
- Romano, M. (2012). *Near real-time detection and approximate location of pipe bursts and other events in water distribution systems*. Tese de doutorado, University of Exeter, 342 pp.