

## I-769 - TAXA DECLINANTE VARIÁVEL VERSUS TAXA CONSTANTE ESTUDO EM ESCALA REAL

**Elizabeth R. Halfeld da Costa**<sup>(1)</sup>

Professora titular do Centro federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais  
Engenheira civil, Mestre e Doutora em Hidráulica e Saneamento na EESC/USP.

**Nélia Henriques Callado**<sup>(2)</sup>

Professora titular da Universidade Federal de Alagoas  
Engenheira civil, Mestre e Doutora em Hidráulica e Saneamento na EESC/USP.

**Endereço**<sup>(1)</sup>: Rua Passa Tempo, 176 - Carmo-Sion - Belo Horizonte-MG - CEP: 30310-760 - Brasil - Tel: (31) 99957-9518 - e-mail: [elizabethhalfeld@cefetmg.br](mailto:elizabethhalfeld@cefetmg.br)

### RESUMO

Foi em meados dos anos 60, que dois métodos de operação de filtros rápidos foram evidenciados; a taxa declinante variável e a taxa constante. A diferença entre eles consiste, basicamente, na forma com que a água entra nos filtros. Assim, se a entrada de água for desafogada, a vazão da estação será distribuída equitativamente por todos os filtros, os quais trabalharão com taxas constantes. Ao contrário, se a entrada de água for afogada todos os filtros funcionarão como vasos comunicantes e as taxas de filtração variarão em cada filtro da estação, conforme grau de colmatação. A operação com taxa declinante tem sido apontada como mais vantajosa por pesquisadores já que evita a ocorrência de transpasse durante a carreira de filtração; minimiza os picos de turbidez da água filtrada no início da operação de um filtro e por aumento da vazão da estação; produz maiores carreiras de filtração, diminuindo, conseqüentemente, o número de lavagens dos filtros. Esse trabalho relata comparativamente a implantação e a operação dos dois métodos de operação em uma estação de tratamento de água em ciclo completo, cujo método de operação dos filtros não era bem definido em função da ampla variação das vazões da estação e pelo não afogamento da tubulação de entrada de água aos filtros para todas as vazões de operação da estação. O trabalho evidenciou que a operação dos filtros com taxa declinante variável, considerando todas as vazões de operação, promoveu uma melhoria da qualidade da água filtrada, o aumento das carreiras de filtração e por conseqüência um menor gasto com água de lavagem dos filtros. Nesse contexto, foi possível comprovar a supremacia da filtração com taxa declinante sobre a filtração com taxa constante.

**PALAVRAS CHAVE:** Filtração rápida, filtração com taxa declinante variável, filtração com taxa constante.

### INTRODUÇÃO

A filtração com taxa constante e a filtração com taxa declinante foram concebidas, por Cleasby (1969, 1972a, 1972b) a partir da retirada de controladores de vazão e de nível dos filtros rápidos por gravidade em algumas estações de tratamento de água da China e dos EUA.

A diferença entre os dois métodos de operação consiste, basicamente, na forma com que a água entra nos filtros. Assim, se a entrada de água, por meio de tubulação ou comporta, for desafogada, a vazão da estação será distribuída equitativamente por todos os filtros, os quais trabalharão com taxas constantes. Ao contrário, se a entrada de água for afogada todos os filtros funcionarão como vasos comunicantes e as taxas de filtração variarão em cada filtro da estação, conforme grau de colmatação.

Posteriormente, Cleasby e Di Bernardo (1980) mostraram a superioridade da filtração com taxa declinante variável sobre a taxa constante, sobretudo em relação à qualidade do efluente nos momentos em que havia variações de vazão. A partir de então, estudos experimentais surgiram fornecendo importantes contribuições para o equacionamento hidráulico desses sistemas.



Pesquisas experimentais sobre a filtração com taxa declinante variável, foram realizadas em instalações piloto. Souza (1990) estudou o posicionamento da crista do vertedor de saída em relação ao topo do meio filtrante, Teixeira (1991), obteve uma metodologia para a previsão da duração da carreira de um sistema de filtração com taxa declinante variável (SFTD) composto por um número qualquer de unidades, a partir de um único filtro piloto, o qual funcionava com taxa de filtração constante e igual à máxima prevista pelo modelo de Di Bernardo (1985, 1986a, 1986b). Machado (1995) estabeleceu um modelo matemático que considerava a influência da capacidade de armazenamento de água a montante dos filtros, baseando-se também no modelo de Di Bernardo (1985, 1986a, 1986b).

A partir dos anos 2000, experiências em instalações de filtração com taxa declinante variável continuaram a ser desenvolvidas. Costa (2001) desenvolveu uma metodologia de trabalho que permitia estudar um SFTD em escala real, testando parâmetros de projeto e realizando simulações em uma instalação piloto, com características similares à da instalação em escala real, para obter as condições mais adequadas de operação do sistema em escala real.

Experiências laboratoriais e numéricas sobre a gestão eficaz de instalações de filtração com taxa declinante variável continuaram a ser desenvolvidas. Zielina (2002), Mackie et al (2003), Dabrowski (2006), Dabrowski (2011), Zielina et. al. (2015) e Dabrowski (2020). A maioria dos pesquisadores fundamentaram seus estudos no modelo e nos trabalhos desenvolvidos por Di Bernardo (1985, 1986a, 1986b, 1987). A partir de 2020, percebe-se uma lacuna na bibliografia referentes aos estudos dos métodos de operação filtros rápidos, em especial da taxa declinante variável.

Como vantagem da filtração com taxa declinante variável sobre a filtração com taxa constante tem sido relatado a diminuição da ocorrência de transpasse durante as carreiras de filtração e a minimização de picos de turbidez da água filtrada, além do aumento das carreiras de filtração.

Atualmente, a Portaria nº 888 de maio de 2021 mostra a preocupação com a possível presença de patógenos de difícil remoção como (oo)cistos de *Cryptosporidium* e cistos de *Giardia*, na água filtrada, os quais são associados à presença da turbidez da água filtrada, evidenciando a importância da melhoria na qualidade do efluente filtrado. Dessa forma, a indicação do método de operação conhecido como taxa declinante variável, pode ser visto como o mais recomendado por produzir melhor qualidade do efluente filtrado.

Esse trabalho relata um estudo de caso em escala real sobre a implementação dos dois métodos de operação; taxa declinante variável e taxa constante, em uma estação de tratamento de água em ciclo completo, com variações de vazões durante a operação. A operação da estação com taxa declinante variável nos filtros da estação, resultou em uma melhoria da qualidade da água filtrada bem como o aumento das carreiras de filtração e por consequência um menor gasto com água para lavagem dos filtros, se comparada a operação da filtração com taxa constante implementada na mesma estação.

## OBJETIVO

Mostrar a supremacia da operação com taxa declinante variável sobre a operação com taxa constante numa estação de tratamento de água, em ciclo completo, que trabalhava com variações de vazão ao longo do dia.

## METODOLOGIA

A estação de tratamento de água em questão é de ciclo completo, com unidades de mistura rápida, floculação, decantação e filtração composta de 10 filtros rápidos por gravidade, cujas vazões de trabalho variavam de 1.100 L/s a 4.419 L/s, dependendo da demanda e do horário de pico energético. A figura 1 mostra esquematicamente os filtros da estação.



Figura 1. Esquema em planta dos filtros da estação de tratamento de água (ETA-RM)

Na implantação de cada método de operação, considerando todas as vazões, estabeleceu-se duas condições de operação para entrada de água nos filtros: entrada de água de forma desafogada (Taxa constante) e entrada de água de forma afogada (Taxa declinante), conforme esquema da figura 2.

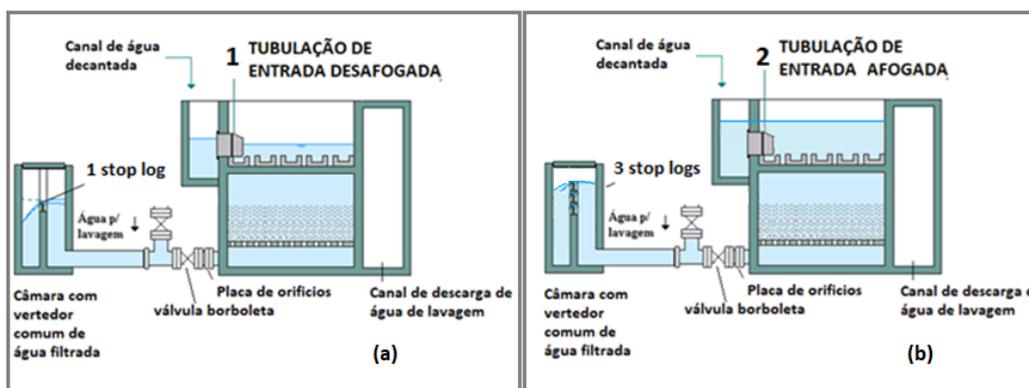


Figura 2. Corte esquemático do filtro, com entrada de água de forma desafogada (a) e afogada (b).

### OPERAÇÃO COM TAXA DECLINANTE VARIÁVEL

Visando a implantação da taxa declinante variável nos filtros, instalou-se três stop-logs na câmara com vertedor comum de água filtrada e utilizou-se a válvula borboleta com várias aberturas, como instrumento capaz de introduzir diferentes perdas de carga turbulenta, de forma a permitir o afogamento constante da entrada de água nos filtros, para todas as vazões de operação da estação.

Para indicar a abertura da válvula borboleta foi instalado um transdutor de posição, que enviava um sinal elétrico para o Controlador Lógico Programável (PLC) existente na estação. A lógica do programa carregado no PLC comparava continuamente a posição da válvula com o valor da abertura determinado para a vazão determinada, corrigindo-a quando necessário. Após implantação da taxa declinante variável, foi possível realizar, por meio PLC, o monitoramento contínuo da vazão, dos níveis no canal de água decantada e da turbidez da água filtrada nos canais 1 e 2 (Figura 1). Dois critérios determinaram o encerramento das carreiras de filtração: quando o nível de lavagem era atingido, ou quando a turbidez da água filtrada atingisse valor máximo de 0,5 uT.



## OPERAÇÃO COM TAXA CONSTANTE

A fim de manter desafogada a entrada de água nos filtros, para todas as vazões, foi necessário manter apenas um stop log no vertedor comum de água filtrada, conforme figura 2a, além de utilizar a válvula borboleta totalmente aberta durante a operação de filtração. Assim, a vazão da estação podia ser equitativamente distribuída em todos os filtros, implementando assim, a taxa constante.

Para o monitoramento da operação com taxa constante o PLC podia registrar continuamente a vazão e a turbidez da água filtrada nos canais 1 e 2 (Figura 1), além dos níveis de água em cada filtro individualmente em função do próprio grau de colmatação. O encerramento da carreira de filtração era determinado ou pelo nível no interior de cada filtro ou quando a turbidez da água filtrada atingisse valores superiores a 0,5 uT. A partir de então a estação poderia funcionar tanto com taxa declinante variável quanto com taxa constante.

## RESULTADOS OBTIDOS

O monitoramento contínuo da operação dos filtros na ETA-RD, pode ser visto a qualquer hora na tela do computador da estação e tiveram um comportamento típico em todos os dias de monitoramento.

A figura 3 representa um dia típico do monitoramento contínuo do sistema de filtração com taxa declinante variável implantado, onde as linhas vermelha e verde representam continuamente a turbidez da água filtrada nos canais 1 e 2. A linha laranja representa a turbidez da água de lavagem, a linha azul representa o nível no canal comum de água decantada e a linha preta a vazão de trabalho da estação ao longo do dia. O nível N2, que comanda a lavagem do filtro mais sujo e o nível N3, que indica o final da lavagem também foram representados na tela do computador.

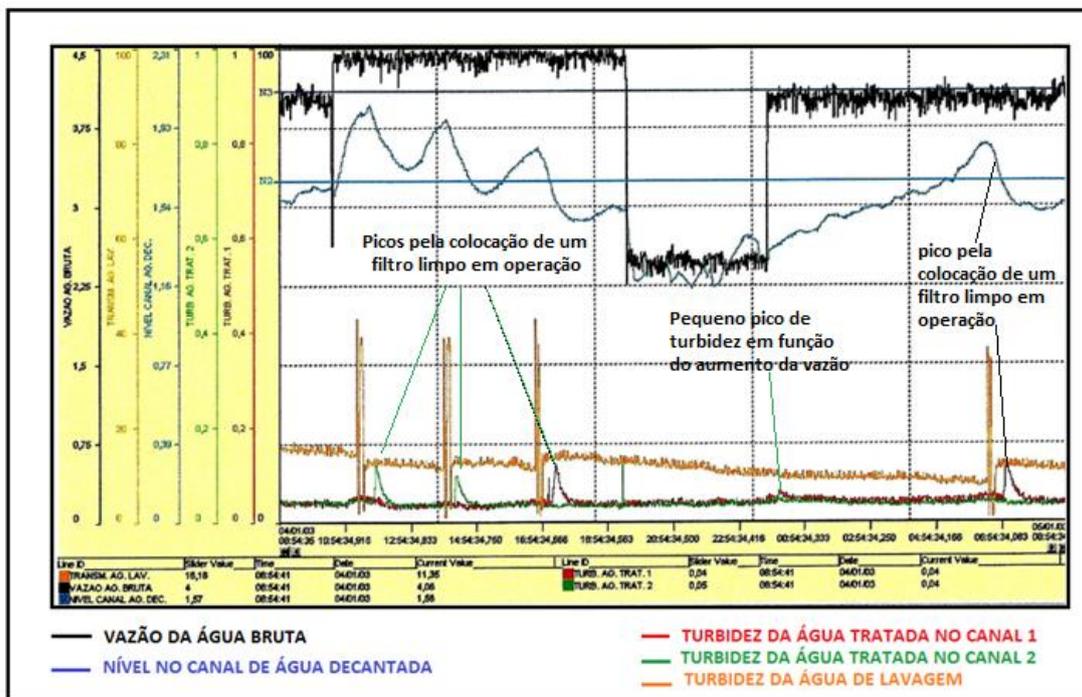


Figura 3. Monitoramento contínuo do sistema de filtração com taxa declinante variável

Após sete dias operando com a taxa declinante variável retirou-se dois stop logs, para desafogar a entrada de água nos filtros, e abriu-se totalmente as válvulas borboletas na saída dos filtros permitindo a operação com taxa constante. A figura 4 apresenta o monitoramento contínuo típico do funcionamento dos filtros com taxa constante.

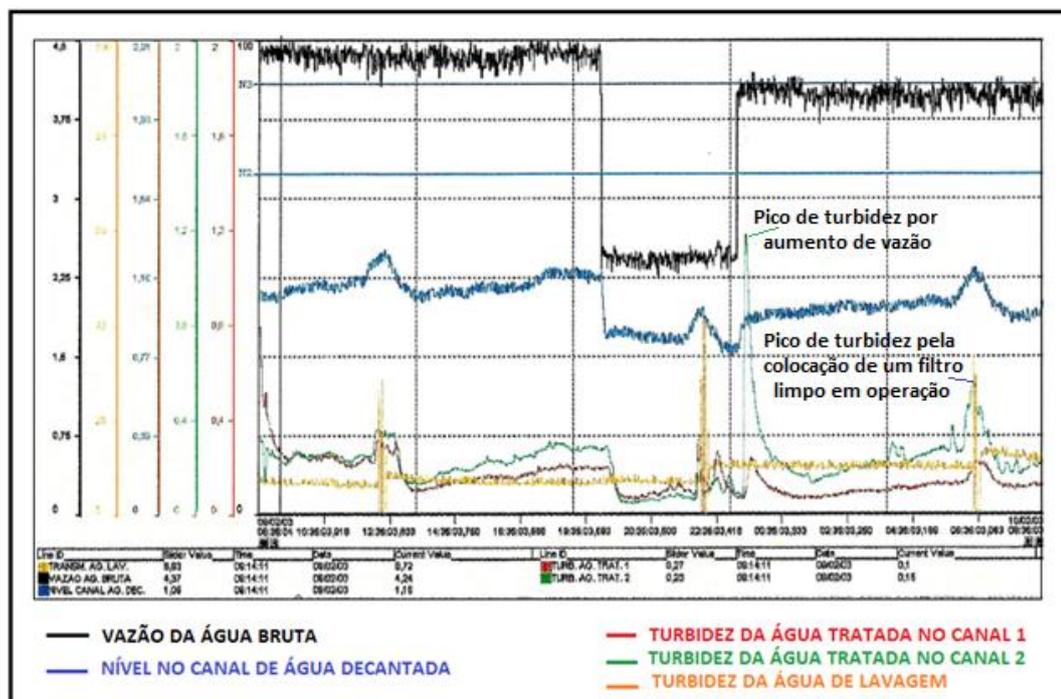


Figura 4. Monitoramento contínuo do método de operação com taxa constante na ETA-RM.

O monitoramento contínuo típico registrado no PLC da estação, operando com taxa constante (Figura 4), mostra a ocorrência de picos de turbidez ao longo de toda a operação dos filtros. Registrou-se a ocorrência de traspasse, chamando a atenção para um pico de turbidez de 1,2 uT, que aconteceu quando a vazão da estação foi subitamente aumentada. Tais picos foram bem mais elevados na operação com taxa constante (figura 4) se comparados aos pequenos picos (valores inferiores a 0,15 uT) que ocorreram na operação com taxa declinante variável (figura 3). A figura 4 evidencia picos frequentes de turbidez (acima de 0,5 UT) ou por aumento de vazão ou após o filtro limpo ser colocado em operação.

## ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Na operação com taxa declinante nenhum pico significativo de turbidez foi registrado por ocasião do aumento da vazão da estação, ou pela colocação de um filtro limpo em funcionamento. O registro da turbidez da água de lavagem servia para auxiliar o monitoramento do tempo gasto para operação de lavagem e da eficiência da mesma. A lavagem de cada filtros era interrompida quando a turbidez da água de lavagem chegasse próxima do valor de 5 UT.

As carreiras de filtração eram encerradas seguindo dois critérios: ou quando o nível N2 era atingido, ou quando a turbidez da água filtrada atingisse 0,5 uT. Em toda a operação com taxa declinante variável o nível N2 sempre foi atingido antes de qualquer elevação da turbidez. Nesse contexto, durante a operação com taxa declinante foi possível obter carreiras que variaram de 52:10 h a 61:32 h.

Na operação com taxa constante, as carreiras de filtração eram encerradas seguindo dois critérios: ou quando o nível máximo no interior do filtro mais sujo era atingido, ou quando a turbidez da água filtrada atingisse 0,5 uT. Algumas vezes, a carreira de filtração era encerrada, quando esses picos de turbidez estavam próximos de 0,5 uT. Por esse motivo as carreiras de filtração média ficaram em torno de 40 horas, inferiores as carreiras de filtração da operação com taxa declinante variável.



Os dados obtidos nesse trabalho confirmam por meio de investigação em escala real as vantagens do método de operação com taxa declinante variável em relação ao método com taxa constante, conforme citado pelos autores Di Bernardo e Cleasby (1980), principalmente no que diz respeito da produção de carreiras de filtração mais longas e a produção de água filtrada de melhor qualidade, mesmo por ocasião do aumento de vazão.

## CONCLUSÕES

A operação dos filtros com taxa declinante variável foi mais vantajosa se comparada a operação com taxa constante, uma vez que, resultou em uma melhoria da qualidade da água filtrada diminuindo os picos de turbidez quando um filtro limpo era colocado em operação ou quando a vazão da estação era aumentada.

A operação da estação com taxa declinante variável proporcionou maiores carreiras de filtração e por consequência um menor gasto com água para lavagem dos filtros, se comparada a operação da filtração com taxa constante implementada na mesma estação.

O estudo de caso em escala real apresentado mostrou a supremacia da taxa declinante variável e relação a taxa constante.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ARBOLEDA, J.V. et al. (1985) Hydraulic behavior of declining-rate filtration, *Journal AWWA*, **77** (12), 67-74.
2. BRASIL. Ministério da Saúde. Gabinete do Ministro. Portaria nº 888, de 04 de maio de 2021.
3. CLEASBY, J.L. (1969) Filter rate control without rate controllers. *Journal AWWA*, **61**(4), 181-185.
4. CLEASBY, J.L. (1972a) New ideas in filter control systems. *Symposium on New Methods of water treatment*, Asuncion, Paraguai.
5. CLEASBY, J.L. (1972b) Case history V: variable declining rate filtration. *Symposium on new methods of water treatment*, Asuncion, Paraguai.
6. CLEASBY, J.L., DI BERNARDO, L. (1980) Hydraulic considerations in declining-rate filtration. *Journal of the Environmental Engineering Division*, **106**(EE6), 1043-1055.
7. COSTA, E.R.H. (2001) *Avaliação do funcionamento de uma instalação de filtração direta descendente com taxa declinante variável em escala real e piloto*, Tese de doutorado, Programa de Pós-graduação em Hidráulica e Saneamento, Departamento de Hidráulica e Saneamento, Universidade de São Paulo, 260 pp.
8. DABROWISKI, W. (2006) The progression of flow rates in variable declining rate filter system Filtrate Quality from Different Filter Operations, *Acta hydrochim. Hydrobiol.*, **34**(5), 442-452.
9. DABROWISKI, W. (2011) Rational operation of variavel declining rate filters, *Environment Protection Engineering*, Wrocław, **37**(4), 35- 53.
10. DABROWISKI, W. (2020) Should variable declining rate filters be operated as one large or several separate plants? *Desalination and Water Treatment* **185**, 105–110.
11. DI BERNARDO, L. Cleasby J.L (1980) Declining-rate versus constant-rate filtration, *Journal of the Environmental Engineering Division*, ASCE, New York, **106**(EE6), 1023-1041.
12. DI BERNARDO, L. (1985) Proposição de um modelo matemático para projeto de sistemas de filtração com taxa declinante. XIII Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Maceió, Brasil.
13. DI BERNARDO, L. (1986a) A rational method to the design of declining-rate filters. *IV World Filtration Congress*. Ostend, Belgium.
14. DI BERNARDO, L. (1986b) Hidráulica da filtração com taxa declinante. *Revista DAE*, **46**(146), 259-267.
15. DI BERNARDO, L. (1987) Designing Declining-Rate Filters. *Filtration and Separation*, Sept/Oct., 338–341.
16. DI BERNARDO, L. (1993) *Métodos e técnicas de tratamento de água*. 1.ed. ABES, Rio de Janeiro, 503 pp.



17. DI BERNARDO, L. et al. (2002) *Ensaio de tratabilidade de água e dos resíduos gerados em estações de tratamento de água*. 1.ed. RiMa, São Carlos, 237pp.
18. DI BERNARDO, L., MACHADO, R. (1993). Influência da capacidade de armazenamento de água a montante dos filtros no comportamento de sistemas de filtração com taxa declinante variável. XVII Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Natal, Brasil.
19. DI BERNARDO, L., MACHADO, R. (1996) Hydraulic Behavior of Declining-rate Filtration System with Storage Capacity Upstream the Filters. VII World Filtration Congress, Budapest, Hungary.
20. DI BERNARDO, L., TEIXEIRA, B.A.N. (1992) Previsão da duração da carreira de filtração em sistemas de filtração com taxa declinante. XXIII Congresso Interamericano de Ingeniería Sanitária y Ambiental, Havana, Cuba.
21. MACHADO, R. (1995). *Proposição de modelação matemática para sistemas de filtração com taxa declinante variável incluindo armazenamento a montante dos filtros*, Tese de doutorado, Programa de Pós-graduação em Hidráulica e Saneamento, Departamento de Hidráulica e Saneamento, Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 103 pp.
22. MAKIE R.I., DABROWISCK W., ZIELINA M. (2003). Numerical study of a rational rule for the operation of variable declining rate filters in response to changes in raw water quality, *Environment Protection Engineering*, **29** (1), 45.
23. PREZOTTI, J.C.S (1991). *Influência da taxa de filtração no desempenho de filtros rápidos e areia uniforme*, dissertação de mestrado, Programa de Pós-graduação em Hidráulica e Saneamento, Departamento de Hidráulica e Saneamento, Universidade de São Paulo, 186 pp.
24. SOUZA, P. R. (1990) *Influência do posicionamento do vertedor de saída nos sistemas de filtração com taxa declinante e taxa constante com nível variável*, Dissertação de mestrado, Programa de Pós-graduação em Hidráulica e Saneamento, Departamento de Hidráulica e Saneamento, Universidade de São Paulo, 253 pp.
25. TEIXEIRA, B.A.N. (1991) *Proposição de um método para obtenção e operação de sistemas de filtração com taxa declinante*, Tese de doutorado, Programa de Pós-graduação em Hidráulica e Saneamento, Departamento de Hidráulica e Saneamento, Universidade de São Paulo, 208 pp.
26. ZIELINA M. (2002). *Theoretical and Empirical Investigations into Water Rapid Filters of Variable Declining Rate*, Thesis presented to the Environmental Engineering Department, Cracow University of Technology, in the partial fulfilment of the requirements for the degree of PhD, 188 pp
27. ZIELINA M. et al (2015) Laboratory and numerical Experiments into efficient management of VDR Filter Plants, *Environment Protection Engineering*, **41**(4), 101-120.