

Resumo

O oxigênio dissolvido é um dos principais parâmetros indicadores da qualidade da água, sendo desejável que se assegurem condições de aerobiose em redes de drenagem de águas residuais, evitando a formação de gases tóxicos, odores indesejáveis e a potencial corrosão de materiais do sistema. A ocorrência de singularidades em colectores, como quedas em câmaras de visita, pode contribuir significativamente para o aumento da concentração de oxigênio dissolvido no escoamento. O presente artigo tem por objectivo contribuir para o avanço de conhecimentos no domínio da transferência de oxigênio em quedas em colectores de águas residuais, nomeadamente em quedas guiadas, quedas verticais e quedas em degraus. A análise de resultados experimentais incidiu essencialmente sobre a transferência de oxigênio em quedas guiadas. Procedeu-se também à comparação dos valores da dissipação de energia e do rearejamento em quedas guiadas com os obtidos em estudos anteriores, em quedas verticais e em degraus.

Palavras-chave:

Quedas guiadas, quedas verticais, quedas em degraus, rearejamento, ressalto hidráulico, razão de défices de oxigênio dissolvido, eficiência do rearejamento.

Abstract**Transfer of oxygen in sewer drops – improvement of wastewater quality**

The dissolved oxygen is a relevant water quality parameter. In sewer systems conveying wastewater it is desirable to maintain aerobic conditions, thus avoiding the release of toxic gases, undesirable odors and the potential corrosion of the system materials. The occurrence of singularities in sewers, namely drops in sewer manholes, may significantly contribute to the increase of dissolved oxygen within the flow. The main objective of the present literary composition is the advancement of knowledge on the transfer of oxygen in sewer drops, namely on backdrops, free-fall drops and stepped drops. In the present study, main focus is given on the performance of the backdrop in the increase of the dissolved oxygen content. A comparative analysis on both the energy dissipation and oxygen transfer in backdrops versus those obtained in previous studies for free-fall drops along with stepped drops were also developed in the present study.

Keywords:

Backdrops, free-fall drops, stepped drops, reaeration, hydraulic jump, dissolved oxygen deficit ratio, reaeration efficiency

Transferência de oxigênio em quedas em colectores – melhoria da qualidade da água residual*

Por: **Rita Teixeira d’Azevedo**, Engenharia do Ambiente/Ramo Sanitária; Mestre em Hidráulica e Recursos Hídricos; Pós-Graduada em Gestão Integrada de Sistemas: Ambiente, Segurança e Qualidade; em Doutorado; Membro da Comissão Especializada de Águas Residuais da APDA e Coordenadora do Grupo de Trabalho ‘Qualidade, Ambiente e Segurança em Sistemas de Águas Residuais’; Coordenadora Geral e Directora Técnica

Rita Teixeira d’Azevedo Consultores – Ambiente, Saneamento, Qualidade, Higiene e Segurança e Responsabilidade Social

Tel.: 919 390 891

E-mail: rita.teixeira.azevedo@gmail.com

(*) Comunicação apresentada no 7º Encontro Nacional de Entidades Gestoras de Água e Saneamento Água XXI/ENEG 2007

1. Introdução

Em sistemas de águas residuais de grande extensão verificam-se geralmente elevados tempos de percurso, potenciando a ocorrência de processos bioquímicos (físicos, químicos e biológicos) que levam à decomposição de matéria orgânica com consumo de oxigênio, sendo desfavorável do ponto de vista do desenvolvimento e persistência de poluentes.

O oxigênio dissolvido é um dos principais parâmetros indicadores da qualidade das águas residuais. A manutenção deste parâmetro em concentração suficiente ao longo dos sistemas de águas residuais, portanto garantindo condições de aerobiose, inibe a ocorrência de gases tóxicos (e.g., gás sulfídrico), odores indesejáveis, potencial corrosão de materiais do sistema e degradação da qualidade das águas residuais, aspectos importantes na exploração dos sistemas de águas residuais, quer em matéria de qualidade da água residual quer a nível da segurança dos trabalhadores.

O emulsãoamento de ar decorrente da turbulência do escoamento é, reconhecidamente, uma importante fonte de oxigênio em sistemas de águas residuais. A turbulência pode ser promovida em estruturas de queda que, fazendo uso do desnível dos planos da água a montante e a jusante, proporcionam o aumento da concentração de oxigênio dissolvido. Estudos experimentais realizados em quedas em sistemas de drenagem urbana e em modelo comprovam este efeito.

A transferência do oxigênio atmosférico para o interior da massa líquida por meio de singularidades, em particular estruturas de queda em câmaras de visita, eventualmente já existentes nos próprios sistemas, permitirá o aumento da turbulência e emulsãoamento de ar – o emulsãoamento de ar resulta no aprisionamento e transporte de porções de ar da atmosfera para o interior do fluido, seguindo-se a fragmentação em bolhas de menor dimensão, devido à turbulência, e posterior transporte dessas bolhas para jusante

– no escoamento, o que poderá dar origem a significativa transferência de gases (*e.g.*, oxigénio, azoto, compostos orgânicos voláteis, gás sulfídrico), redução de Carência Bioquímica de Oxigénio (CBO₅), aumento da eficiência de remoção de CBO₅ e Sólidos Suspensos Totais (SST) e incremento da biomassa.

2. Enquadramento geral

A transferência de oxigénio devido ao aumento da turbulência no escoamento provocada por singularidades, como quedas em câmaras de visita, é um tema que tem sido objecto de alguns estudos em protótipo e em laboratório. Os estudos em protótipo foram realizados por Matos (1991), Pincince (1991), Zitner *et al.* (1998), Almeida *et al.* (1999) e Soares (2003).

Os ensaios realizados em laboratório, nomeadamente na instalação experimental construída no Laboratório de Hidráulica e Recursos Hídricos (LHRH) do Instituto Superior Técnico (IST), iniciaram-se no âmbito do trabalho final de curso da licenciatura em Engenharia do Ambiente (IST) intitulado ‘Hidráulica e rearejamento em quedas verticais em colectores. Estudo experimental’ (Sousa e Lopes, 2002). Os resultados da investigação permitiram, com base em medições da altura de escoamento e caudal, determinar expressões adimensionais para quantificar a perda de carga na queda e com ocorrência de ressalto hidráulico no trecho de jusante do colector, bem como quantificar o rearejamento em quedas verticais para alturas de queda compreendidas entre 0,10 e 0,40 m.

Seguiram-se os ensaios no âmbito da dissertação de mestrado em Hidráulica e Recursos Hídricos, na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, intitulada ‘Rearejamento em quedas em colectores de águas residuais’ (Soares, 2003). Com base nos ensaios desenvolvidos na instalação experimental, aquela autora procedeu ao estudo do rearejamento

provocado por quedas verticais em colectores, a jusante das quais há lugar à formação do ressalto hidráulico, para alturas de queda entre 0,10 e 0,50 m, propondo expressões para estimar a razão de défices de oxigénio dissolvido em função da perda de carga total e da altura de queda, assim como expressões adimensionais para estimar o rearejamento em quedas verticais em colectores.

Afonso (2004), no âmbito da dissertação de mestrado em Hidráulica e Recursos Hídricos apresentada no IST e intitulada ‘Dissipação de energia e rearejamento em quedas em colectores’, analisou quedas em degraus com altura total compreendida entre 0,20 e 0,40 m, procedendo ao estudo da dissipação de energia e do rearejamento em quedas em degraus e no ressalto hidráulico, propondo expressões para estimar a perda de carga na queda e no ressalto hidráulico que se forma imediatamente a jusante da mesma, e comparou com os resultados obtidos em quedas verticais por Sousa e Lopes (2002) e Soares (2003).

Na sequência destes trabalhos em laboratório, considerou-se de interesse complementar os estudos para estruturas de queda, que são de uso comum em sistemas de colectores de águas residuais, por meio da investigação levada a cabo pela autora e elaboração de dissertação de mestrado ‘Transferência de Oxigénio em Quedas Guiadas em Colectores’ (Teixeira d’Azevedo, 2006).

3. Objectivos do estudo

O presente estudo, baseado em investigação de índole teórico-experimental, tem como objectivo contribuir para o estudo do processo de transferência de oxigénio em estruturas hidráulicas em sistemas de águas residuais, em particular em quedas guiadas em câmaras de visita em colectores e respectiva comparação com quedas verticais e quedas em degraus.

Para o efeito, entendeu-se que a investigação satisfizes os seguintes objectivos específicos:

- Estudo da perda de carga total, que se deve à queda e ao ressalto hidráulico que se forma no colector de jusante, a partir da medição da altura do escoamento e da altura piezométrica, para diversos valores de altura de queda (0,30, 0,40 e 0,50 m), caudal (1,2, 2,1, 3,0 e 3,9 l/s) e distinta localização do ressalto hidráulico (0,10, 0,20 e 0,70 m a jusante da queda);
- estudo da influência da concentração de reagentes, para remoção do oxigénio dissolvido da água, na evolução temporal da concentração de oxigénio dissolvido nas sondas a montante e a jusante da queda;
- análise da transferência de oxigénio dissolvido em quedas guiadas, para diversos valores de altura de queda, caudal e distinta localização do ressalto hidráulico, a partir da medição da concentração de oxigénio dissolvido e temperatura, recorrendo a dois procedimentos para a determinação do tempo de percurso do escoamento entre as sondas de montante e de jusante;
- obtenção de expressões para estimar a perda de carga total, assim como o rearejamento em quedas guiadas em colectores;
- comparação dos resultados obtidos por outros autores na mesma instalação experimental para quedas verticais e quedas em degraus.

A metodologia adoptada para satisfazer os objectivos propostos baseou-se em investigação experimental na instalação existente no LHRH, por meio da medição de grandezas hidráulicas (altura do escoamento e altura piezométrica) e de qualidade da água (oxigénio dissolvido, temperatura, condutividade).

4. Processo de transferência/balço de oxigénio

Os processos de consumo de oxigénio dissolvido podem ocorrer no

*dskjfsdkjfhkdfas
sjkhkhjsdga
sdahjñasdfñklasdf
sdfñjkl*

interior da massa líquida, pela biomassa suspensa, bem como no interior do biofilme. A manutenção de condições aeróbias nos sistemas de drenagem de águas residuais pode ser conseguida pela transferência do oxigénio atmosférico para o interior da massa líquida através da interface ar-água. Essa transferência inclui dois tipos de contribuições – o rearejamento contínuo através da superfície livre e o rearejamento devido à turbulência provocada por singularidades nos sistemas de águas residuais, como quedas em câmaras de visita em colectores – câmara de visita para ligação de um ramal ou de um colector situado a nível superior, por intermédio de um tubo vertical que desemboca na caleira da câmara de visita ou ligeiramente acima, de acordo com a norma NP EN 752-1:1999 –, ligações domiciliárias, irregularidades nas juntas ou ocorrência de ressalto hidráulico.

Os valores da concentração de oxigénio dissolvido nos trechos de cabeceira dos sistemas de drenagem de águas residuais são, em regra, relativamente altos. À medida que as águas residuais são escoadas para jusante, as condições de rearejamento tornam-se mais desfavoráveis, em resultado do aumento da altura do escoamento e da secção. Assim, torna-se mais significativo o consumo de oxigénio, quer no interior da massa líquida, quer nos biofilmes aderentes às paredes dos colectores. Em geral, verifica-se uma tendência de redução gradual da concentração

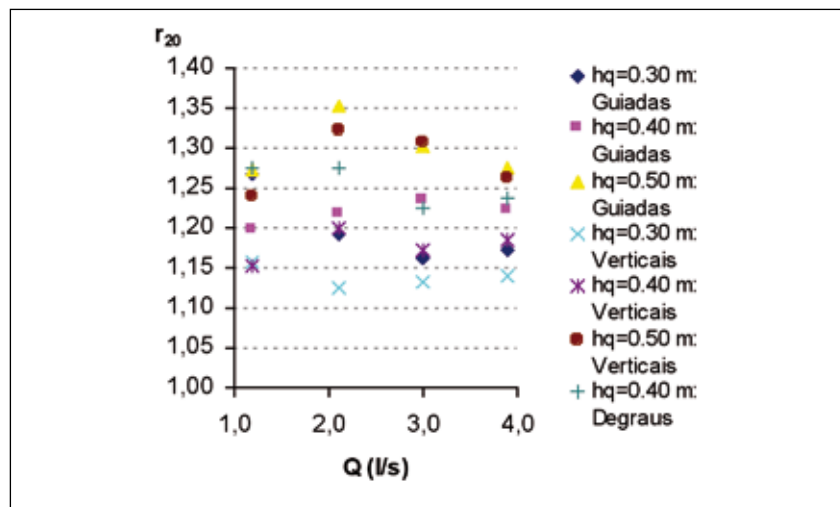


Figura 1. Razão de défices de oxigénio dissolvido em função do caudal para $0,30 \leq h_q \text{ (m)} \leq 0,50$. Ressalto hidráulico a $0,20 \text{ m}$ a jusante da queda guiada. Quedas guiadas, verticais e em degraus (Teixeira d'Azevedo, 2006).

de oxigénio dissolvido à medida que o escoamento se processa para jusante. No caso da afluência de águas pluviais aos colectores, poderá verificar-se a suspensão de sedimentos e arraste do filme biológico, sendo o efeito da sua composição especialmente relevante na diminuição da qualidade das águas residuais.

Os principais processos bioquímicos que envolvem o oxigénio dissolvido ao longo da rede de drenagem de águas residuais podem ser contabilizados com base no balanço de massas de oxigénio dissolvido, onde se incluem as seguintes parcelas:

- Consumo de oxigénio pela biomassa em suspensão e pelo biofilme;
- consumo de oxigénio pelos sedimentos (em colectores onde se verificam condições de autolimpeza – garantia de condições de transporte sólido, asseguradas pelo poder de transporte mínimo de $2,0 \text{ N/m}^2$ e altura mínima da lâmina líquida no colector de $0,025 \text{ m}$ – não ocorre sedimentação significativa, o que se traduz numa eliminação deste processo no balanço total de oxigénio);
- rearejamento contínuo através da superfície livre;
- rearejamento por efeito do emulsão de ar no escoamento,

decorrente da turbulência provocada por quedas e outras singularidades presentes nos colectores;

- contribuição ou redução de oxigénio pela infiltração (em geral, esta parcela é eliminada do balanço tendo em conta que os sistemas têm uma adequada estanqueidade dos colectores, juntas e câmaras de visita).

O rearejamento num escoamento de emulsão ar-água é o processo de transferência de oxigénio atmosférico contido nas bolhas de ar para a massa líquida, através da sua interface. Os mecanismos intervenientes são a entrada de ar atmosférico que ocorre livremente em escoamentos (devido a turbulência da superfície livre ou a impacto de jactos) ou forçada (devida a arejadores mecânicos) e o transporte e fragmentação de bolhas de ar. Se a capacidade de transporte do escoamento for baixa, parte do ar emulsionado pode libertar-se rapidamente, o que pode não contribuir para o aumento significativo da transferência de oxigénio para a massa líquida.

O rearejamento está relacionado com diversos factores, tais como:

- Número de Froude;
- velocidade média do escoamento;
- perda de carga unitária;
- altura média do escoamento;

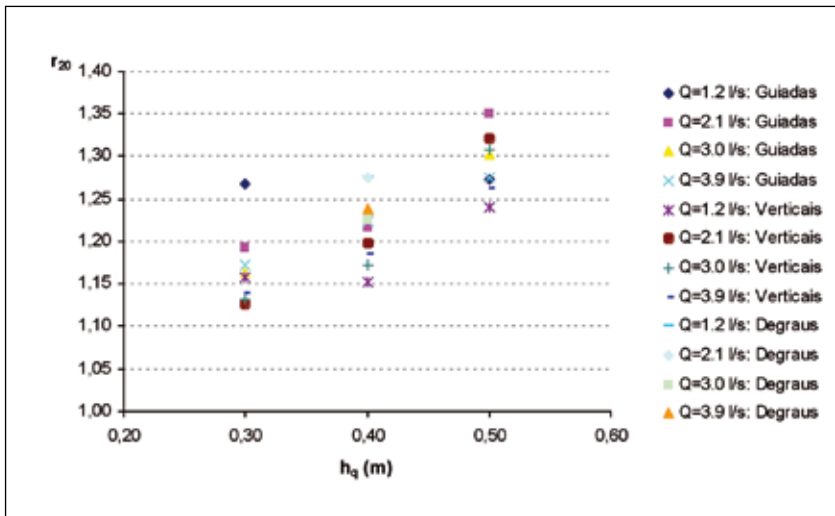


Figura 2. Razão de défices de oxigênio dissolvido em função da altura de queda para $1,2 \leq Q \text{ (l/s)} \leq 3,9$. Ressalto hidráulico a 0,20 m a jusante da queda guiada. Quedas guiadas, verticais e em degraus (Teixeira d’Azevedo, 2006).

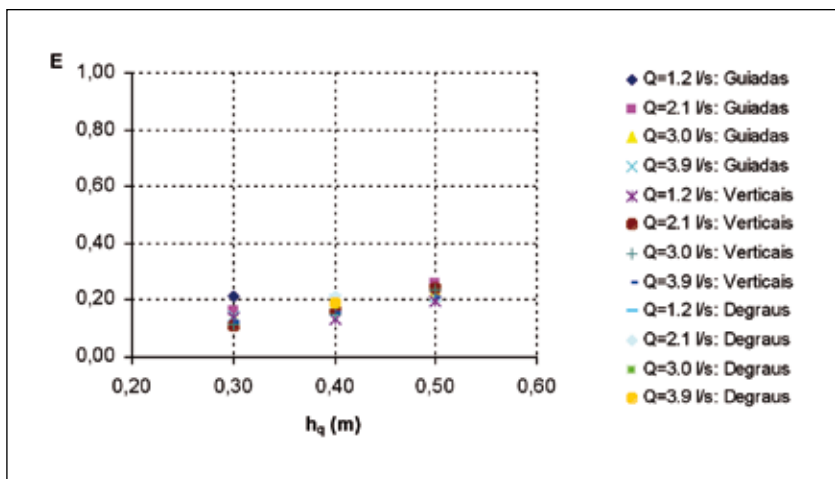


Figura 3. Eficiência do rearejamento em função da altura de queda para $1,2 \leq Q \text{ (l/s)} \leq 3,9$. Ressalto hidráulico a 0,20 m a jusante da queda guiada. Quedas guiadas, verticais e em degraus (Teixeira d’Azevedo, 2006).

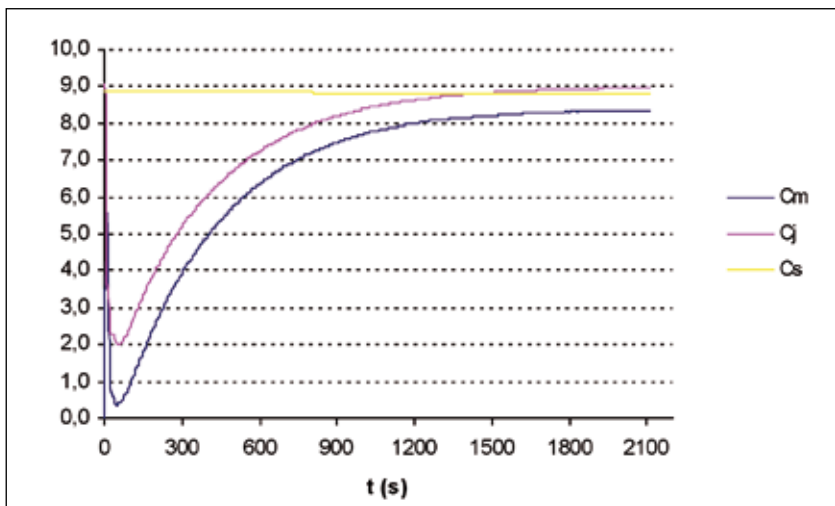
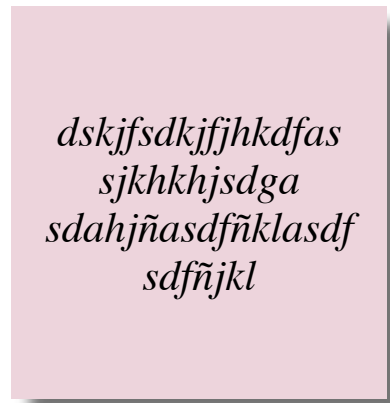


Figura 4. Evolução temporal da concentração de oxigênio dissolvido para $h_q = 0,40 \text{ m}$ e $Q = 2,1 \text{ l/s}$. Ressalto hidráulico a 0,10 m a jusante da queda (E402110-1) (Teixeira d’Azevedo, 2006).



- temperatura e humidade;
- natureza e composição da massa líquida.

No que diz respeito à natureza e composição da massa líquida, o efeito das impurezas poderá reduzir a tensão superficial da água, contribuindo para a formação de uma película mais estável e resistente à penetração dos gases e, consequentemente, levar à diminuição da transferência de oxigênio através da superfície livre.

No que concerne às grandezas hidráulicas, a velocidade média do escoamento conduz ao aumento do rearejamento, enquanto que para idêntica velocidade média, o aumento da altura média do escoamento conduz à diminuição do rearejamento.

5. Análise de resultados e conclusões

A análise dos resultados permitiu destacar as seguintes conclusões:

- A perda de carga total aumenta com a altura de queda. Para idêntica altura de queda, constata-se que a perda de carga total aumenta com a diminuição do caudal;
- o caudal (Q) não exerce influência apreciável no rearejamento (razão de défices de oxigênio dissolvido – r_{20}), para a gama de valores analisados em modelo físico (Figura 1);
- a altura de queda (h_q) é o factor que maior influência exerce no rearejamento. Verifica-se a dependência da razão do défice de

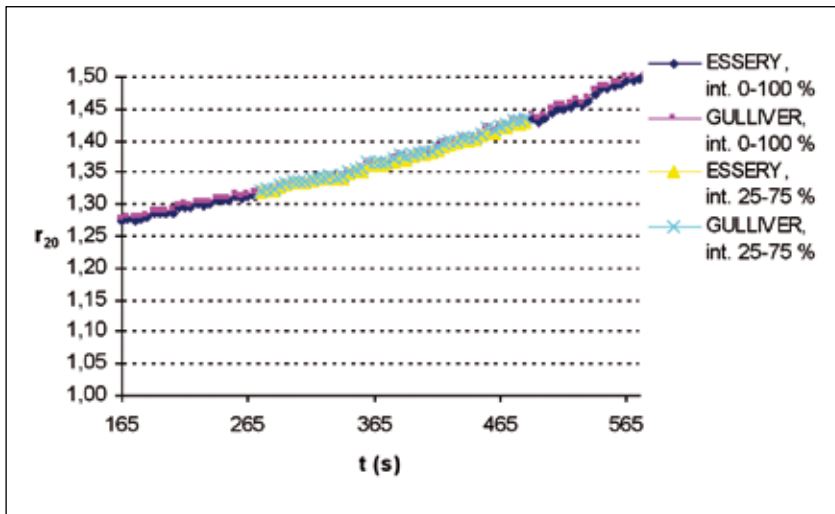


Figura 5. Evolução temporal da razão de défices de oxigênio dissolvido no intervalo de tempo útil de dados (0%-100 % e 25%-75 %), para $h_s = 0,40$ m e $Q = 2,1$ l/s. Ressalto hidráulico a 0,10 m a jusante da queda (E402110-1) (Teixeira d’Azevedo, 2006).

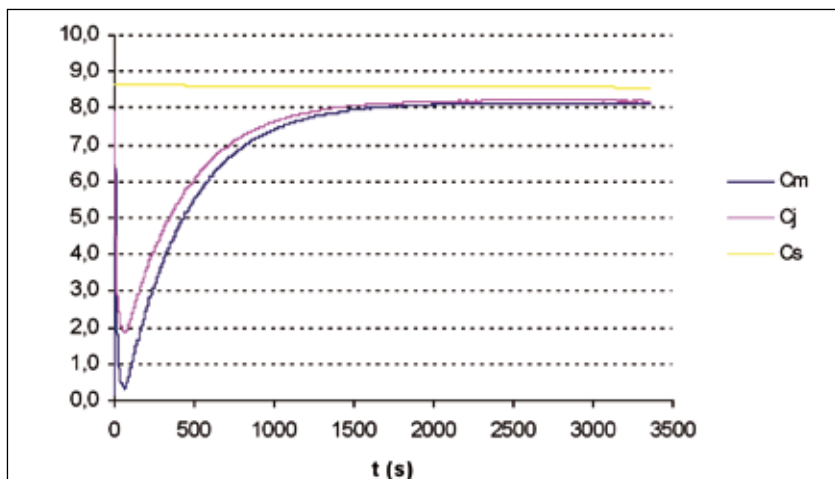


Figura 6. Evolução temporal da concentração de oxigênio dissolvido para $h_q = 0,40$ m e $Q = 2,1$ l/s. Ressalto hidráulico a 0,10 m a jusante da queda (E402110-4) (Teixeira d’Azevedo, 2006).

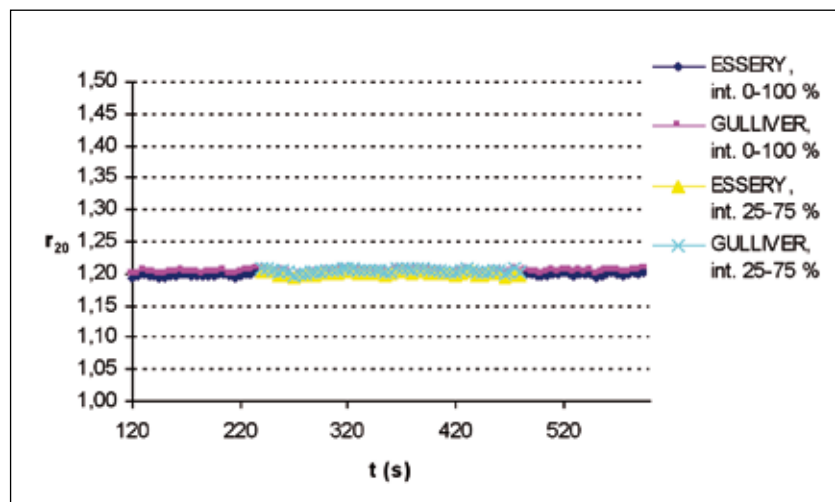


Figura 7. Evolução temporal da razão de défices de oxigênio dissolvido no intervalo de tempo útil de dados (0%-100 % e 25%-75 %), para $h_s = 0,40$ m e $Q = 2,1$ l/s. Ressalto hidráulico a 0,10 m a jusante da queda (E402110-4) (Teixeira d’Azevedo, 2006).

oxigênio dissolvido (r_{20}) com a altura de queda, traduzida em geral por um aumento de r_{20} com a mesma (Figura 2). O mesmo comportamento verifica-se para a eficiência do rearejamento (E) (Figura 3);

- os valores médios da razão de défices de oxigênio dissolvido em quedas guiadas são ligeiramente superiores aos obtidos em quedas verticais e ligeiramente inferiores aos obtidos em quedas em degraus, para a altura de queda de 0,40 m. Idêntico comportamento verifica-se para a eficiência do rearejamento;
- a localização do ressalto hidráulico a 0,70 m a jusante da queda guiada origina valores da razão de défices de oxigênio dissolvido ligeiramente superiores às restantes localizações de ocorrência de ressalto hidráulico, para idêntica altura de queda;
- verifica-se que, onde ocorre o impacto do jacto na parede do trecho da queda guiada, em geral, para os caudais mais elevados (3,0 e 3,9 l/s), a altura do escoamento no colchão de água a jusante da queda é ligeiramente superior à que se observa nas restantes condições estudadas. Verificou-se ainda haver um ligeiro acréscimo do emulsionamento de ar no escoamento;
- a análise dos resultados obtidos em quedas guiadas afigura haver uma dependência da razão de défices de oxigênio dissolvido com o défice de oxigênio dissolvido a montante da queda, tendo tendência a diminuir para valores da concentração de oxigênio dissolvido próximos da saturação;
- a permanência de reagentes químicos, nomeadamente de sulfito de sódio, no decorrer do ensaio, irá consumir o oxigênio dissolvido, invalidando as medições iniciais, resultando em ensaios não credíveis, conforme a análise de resultados e gráfica da evolução temporal da concentração de oxigênio dissolvido a montante e a

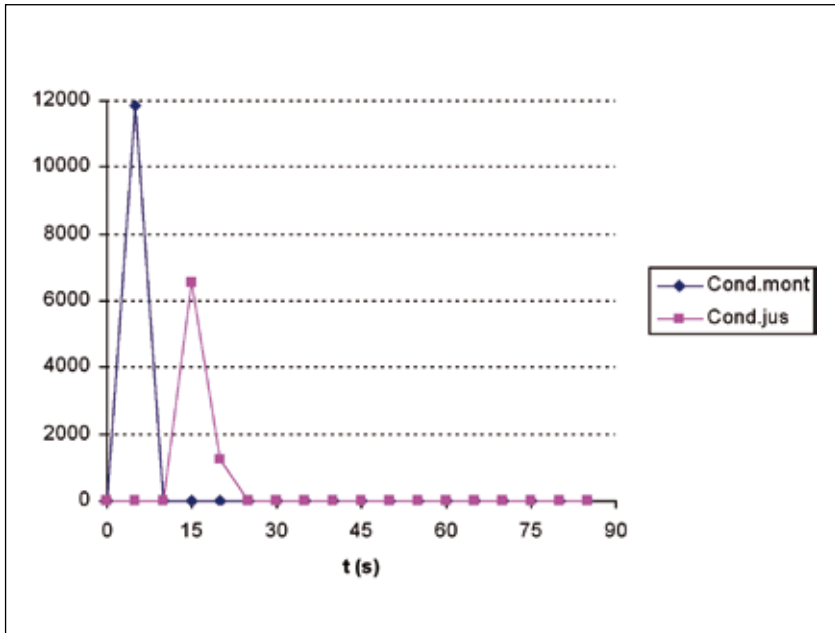


Figura 8. Evolução temporal da condutividade nas sondas a montante e a jusante da queda para $h_q = 0,40$ m e $Q = 3,9$ l/s. Ressalto hidráulico a $0,20$ m a jusante da queda (E403920-7) (Teixeira d’Azevedo, 2006).

jusante da queda (**Figura 4**) e da razão de défices de oxigénio dissolvido (**Figura 5**). Em contraste, exemplificam-se dois gráficos plausíveis para o estudo (**Figuras 6 e 7**);

- verifica-se, em geral, idêntico tempo de percurso do escoamento entre as sondas de montante e de jusante por determinação com traçador (**Figura 8**) e estimado pela análise gráfica da evolução da concentração de oxigénio dissolvido ao longo do tempo.

6. Bibliografia

- [1] Afonso, J. (2004). “Dissipação de Energia e Rearejamento em Quedas em Colectores”. Dissertação de Mestrado, UTL/IST, Lisboa.
- [2] Almeida, M.C.; Butler, D.; Matos, J.S. (1999). “Reaeration by sewer drops”. 8th Int. Conf. on

Urban Storm Drainage, Sydney, Australia.

- [3] Chanson, H. (1994). “Hydraulic design of stepped cascades, channels, weirs and spillways”. Pergamon, Inglaterra.
- [4] Essery, I.T.S.; Tebbutt, T.H.Y.; Rasaratnam, S.K. (1978). “Design of spillways for re-aeration of polluted waters”. Report 72, CIRIA, ISSN 0305-408X.
- [5] Gameson, A.L.H. (1957). “Weirs and the Aeration of Rivers”. J. Inst. Water Eng. Sc., Vol. 11, pp. 477-490.
- [6] Gulliver, J.S.; Rindels, A.J. (1993). “Measurement of Air-Water Oxygen Transfer at Hydraulic Structures”. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 119, N° 3, pp. 327-349.
- [7] Matos, J.S. (1991). “Aerobiose e Septicidade em Sistemas

de Drenagem de Águas Residuais”. Dissertação de Doutoramento em Engenharia Civil, UTL/IST, Lisboa.

- [8] Pincince, A.B. (1991). “Transfer of Oxygen and Emissions of Volatile Organic Compounds at Clarifier Weirs”. Research Journal WPCF, Vol. 63, N° 2, pp. 114-119.
- [9] Rajaratnam, N.; Mainali, A.; Hsung, C.Y. (1997). “Observations on Flow in Vertical Dropshafts in Urban Drainage Systems”. Journal of Environmental Engineering, ASCE, Vol. 123, N° 5, pp. 486-491.
- [10] Soares, A. (2003). “Rearejamento em Quedas em Colectores de Águas Residuais”. Dissertação de Mestrado, FCTUC, Coimbra.
- [11] Sousa, C.M.; Lopes, R.R. (2002). “Hidráulica e Rearejamento em Quedas Verticais em Colectores. Estudo Experimental”. Relatório do Trabalho de Fim do Curso, UTL/IST, Lisboa.
- [12] Tebbutt, T.H.Y.; Essery, I.T.S.; Rasaratnam, S.K. (1977). “Reaeration Performance of Stepped Cascades”. Journal Instn. Water Engineering Science, Vol. 31, N° 4, pp. 285-297.
- [13] Teixeira D’Azevedo, R. (2006). “Transferência de Oxigénio em Quedas Guiadas em Colectores”. Dissertação de Mestrado, Universidade Técnica de Lisboa/Instituto Superior Técnico (UTL/IST), 108 pp. (excluindo anexos).
- [14] Zytner, R.G.; Rahmé, Z.G.; Labocha, M. (1998). “Oxygen uptake at Parshall flumes”. J. Civ. Eng., NRA Canada, 25, 769-776.