

Caracterização dos reservatórios de água para consumo humano em Portugal

Characterization of drinking water storage tanks in Portugal

Monteiro, L.^{a1*} , Pinheiro, A.^{a2}, Carneiro, J.^{a3}, Covas, D.^{a4} 

^aCERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, Lisboa, Portugal.

E-mail: ^{a1}laura.monteiro@tecnico.ulisboa.pt, ^{a2}alexandre.pinheiro@tecnico.ulisboa.pt, ^{a3}joana.carneiro@tecnico.ulisboa.pt,

^{a4}didia.covas@tecnico.ulisboa.pt

*Autor para correspondência

Recibido: 07/05/2020

Aceptado: 24/11/2020

Publicado: 31/01/2021

Citar como: Monteiro, L., Pinheiro, A., Carneiro, J., Covas, D. 2021. Characterization of drinking water storage tanks in Portugal. *Ingeniería del agua*, 25(1), 49-58. <https://doi.org/10.4995/la.2021.13659>

RESUMO

Os reservatórios de água para consumo humano permitem garantir reservas de água nos sistemas de abastecimento e gerir variações do consumo. Contudo, a sua configuração e os modos de operação podem ter implicações na qualidade da água distribuída. Este trabalho apresenta uma caracterização dos reservatórios de água em Portugal, incidindo nas características físicas e operacionais que condicionam o seu desempenho do ponto de vista da mistura e renovação da água. Foi pela primeira vez avaliada a mistura da água nos reservatórios portugueses, pela determinação das frações de volumes de renovação necessárias para garantir a mistura da água que entra em cada ciclo de enchimento com a já existente. Os resultados mostram que a mistura é garantida em cerca de 74% das células circulares e que a variação de nível necessária para tal num ciclo de enchimento é, em média, de 51%.

Palavras chave | reservatórios, tempo de mistura, volume de renovação, qualidade da água para consumo humano.

ABSTRACT

Drinking water storage tanks allow to store water in the supply systems and help managing water demand variations. However, the tanks' configuration and operation modes can also affect the quality of the supplied water. This paper presents a characterization of water storage tanks in Portugal, focusing on the physical and operational characteristics that affect their performance regarding mixing and water renewal. For the first time, water mixing in Portuguese storage tanks was assessed by determining the volume of renewal fractions needed to ensure the mixing of water entering each filling cycle with the existing one. The results show that mixing is guaranteed in about 74% of the circular cells and that the level variation required for this in a filling cycle is, on average, of 51%.

Key words | water storage tanks, mixing time, turnover volume, drinking water quality.

INTRODUÇÃO

Os reservatórios dos sistemas de abastecimento de água para consumo humano são tradicionalmente projetados para compensar flutuações do consumo, equilibrar as pressões na rede de distribuição e garantir volumes de reserva em situações de emergência (e.g., para combate a incêndios). A prática de projeto leva a que os reservatórios, de uma forma geral, estejam sobredimensionados e não garantam a mistura e renovação adequada da água no seu interior, levando à formação de zonas de estagnação com elevados tempos de residência da água (Grayman et al., 2004). A estagnação da água nos reservatórios propicia o decaimento do desinfetante residual, a formação de subprodutos de desinfecção, o crescimento de biofilme e a acumulação de sedimentos (Clark et al., 1996), pelo que pode comprometer a qualidade e segurança da água distribuída. Assim, da deficiente mistura e renovação de água nos reservatórios resulta também a necessidade de aumentar a frequência de limpeza e desinfecção dos mesmos. Importa, portanto, identificar os fatores que condicionam o tempo de permanência e o percurso da água, e identificar as medidas adequadas para promover a mistura e a renovação da água no interior dos reservatórios.

A mistura e o envelhecimento da água num reservatório encontram-se intrinsecamente relacionadas com as características físicas do mesmo (e.g., geometria, localização e número de entradas/saídas de água) (Rossman e Grayman, 1999), bem como com as condições de operação (e.g., níveis mínimos e máximos, caudais de entrada) (Grayman et al., 2004; Zhang et al., 2012). Também a estratificação térmica, devida à diferença de temperaturas entre a água que entra e a armazenada, tem impacto na mistura da água (Chuo et al., 2003). O grau de mistura da água que entra num reservatório com a armazenada depende grandemente do fluxo de quantidade de movimento, assim como da localização e orientação do(s) jato(s) de entrada de água (Nordblom e Bergdahl, 2004; Tian e Roberts, 2008a). O tempo e a frequência dos ciclos de enchimento/esvaziamento têm, portanto, um papel decisivo na eficácia da mistura. Contudo, estes ciclos são muitas vezes determinados pelas tarifas da energia elétrica, sendo o enchimento por bombeamento maioritariamente realizado em período noturno, correspondente ao de menor custo (McCormick e Powell, 2003). Também a necessidade de garantir reservas de emergência leva a que muitos reservatórios sejam operados a níveis muito próximos do máximo. Tais decisões operacionais não têm em conta os impactos na renovação da água no interior dos reservatórios e, conseqüentemente, na qualidade da água distribuída (Cherchi et al., 2015).

O tempo de mistura, entendido como o tempo necessário para que uma quantidade conhecida de uma substância conservativa (traçador) adicionada atinja um determinado grau de homogeneidade no reservatório, t_m , é uma função da velocidade média do jato, u , do diâmetro da conduta de entrada, d , do diâmetro da secção transversal em planta do reservatório, D , (no caso de reservatórios circulares) e da altura de água armazenada, H (Equação 1) (Tian e Roberts, 2008b). Esta dependência é válida quando o escoamento de entrada é puramente turbulento e, portanto, independente da viscosidade da água e do número de Reynolds. Rossman e Grayman (1999) demonstraram, através de um conjunto de ensaios em modelos reduzidos de reservatórios circulares, que o tempo de mistura pode ser estimado através da Equação 1.

$$t_m = \frac{\tau_m V^{2/3}}{M^{1/2}} \quad (1)$$

em que τ_m é o tempo de mistura adimensional, V é o volume do reservatório e M é o fluxo de quantidade de movimento do jato de entrada. Esta equação é válida para reservatórios circulares com rácios H/D entre 0.11 e 0.49 e pressupõe que a temperatura da água que entra é igual à temperatura da água que se encontra armazenada e que, portanto, não existem diferenças de densidade. De notar que a Equação 1 evidencia o fluxo de quantidade de movimento do jato de entrada e o volume de água existente no reservatório como os fatores determinantes da mistura. O parâmetro τ_m foi estimado em 10.2 nos referidos estudos. Roberts *et al.* (2006) avaliaram o efeito do rácio H/D na mistura em reservatórios cilíndricos, tendo concluído que o tempo de mistura adimensional (τ_m) é apenas constante numa gama de rácios H/D baixos (Equação 2).

$$\tau_m = \begin{cases} 10 & ; \frac{H}{D} \leq 0.8 \\ 10 + 3.5 \left(\frac{H}{D} - 1 \right) & ; \frac{H}{D} > 0.8 \end{cases} \quad (2)$$

Na operação de um reservatório de água poderá garantir-se a mistura eficaz da água que entra com a existente desde que o tempo de enchimento, t_e , seja superior ao tempo de mistura, t_m . Desta forma, é possível prevenir a formação de bolsas de água com diferentes tempos de residência, isto é, com diferentes idades e características químicas e microbiológicas, ao longo de ciclos contínuos de enchimento e esvaziamento (Rossman e Grayman, 1999). Sendo o tempo de enchimento dado por $\Delta V/Q$, em que ΔV é o volume adicionado ao reservatório num ciclo de enchimento e Q é o caudal de entrada, então para garantir a mistura desejável dever-se-á verificar a relação expressa na Equação 3 ou, de forma equivalente, na Equação 4.

$$\frac{\Delta V}{Q} > \frac{\tau_m V_{min}^{2/3}}{M^{1/2}} \quad (3)$$

$$\frac{\Delta V}{V_{min}} > \frac{9d}{V_{min}^{1/3}} \quad (4)$$

em que V_{min} é o volume de água correspondente à altura mínima de operação durante um ciclo de enchimento. Esta expressão permite determinar a fração de volume do tanque ($\Delta V/V_{min}$) que é necessário renovar em cada ciclo de enchimento para garantir a mistura da água que entra com a existente. De notar que esta fração depende apenas do volume mínimo armazenado no reservatório e do diâmetro da conduta de entrada, d , mas não do caudal de entrada.

Na prática de operação dos sistemas de abastecimento de água, pouco é conhecido acerca dos tempos de permanência da água nos reservatórios, das condições de mistura ou da existência de zonas de estagnação. Este artigo tem como objetivos i) caracterizar os reservatórios de água para consumo humano existentes em Portugal, incidindo nas características geométricas e operacionais que condicionam o seu desempenho do ponto de vista da mistura e da renovação da água, ii) estimar os tempos de mistura nos reservatórios e iii) avaliar se as condições de operação atuais permitem a mistura da água que entra em cada ciclo de operação com a existente no seu interior.

METODOLOGIA

O estudo baseou-se num inquérito desenvolvido em formato Microsoft Excel, distribuído a 11 entidades gestoras de sistemas de abastecimento de água em Portugal. Às entidades participantes foi pedido que registassem, para cada reservatório, o tipo de sistema em que estão incluídos (alta, misto ou baixa) e o número de células. Para cada célula, e uma vez que cada reservatório pode ser composto por várias células com características infraestruturais e operacionais diferentes, foi pedido que registassem características como a forma (circular, retangular ou quadrangular), o tipo (enterrado, semi-enterrado, apoiado, elevado), as dimensões, a capacidade, a existência de estruturas interiores (como septos ou dispositivos de mistura ativa), o número de entradas e saídas de condutas de água e os seus respetivos diâmetros e localizações, e condições operacionais como níveis de água (mínimo e máximo) e caudal (mínimo e máximo). Cada célula foi caracterizada pelo rácio altura/diâmetro, H/D , sendo que para células com formato retangular ou quadrangular foi estimado o diâmetro equivalente, D_{eq} , com base na área da secção transversal em planta, A (Rossman, 2000).

$$D_{eq} = \sqrt{4A / \pi} \quad (5)$$

Os dados obtidos foram tratados de forma estatística, tendo sido determinados os máximos, mínimos e as medianas para as diversas distribuições (ano de construção, capacidade, rácio H/D).

Para a determinação dos tempos de mistura de cada célula com formato circular foi aplicada a Equação 1, tendo sido o tempo de mistura adimensional calculado de acordo com a Equação 2. A fração de volume de renovação que garante um adequado grau de mistura durante o enchimento foi estimada pela Equação 4.

RESULTADOS

Caracterização geral da amostra

Os elementos obtidos com o inquérito permitiram constituir uma base de dados de características geométricas e operacionais de uma amostra de 372 reservatórios. Estes fazem parte de sistemas de distribuição em baixa (42%), em alta (28%) ou mistos (30%). Cerca de 49% dos reservatórios desta amostra têm apenas uma célula, 45% têm duas células e 6% têm três ou mais células, num total de 593 células. Uma vez que um reservatório pode ser constituído por células de diferentes formas e tipologias, os resultados aqui apresentados são relativos às células e não aos reservatórios.

Os reservatórios que compõem a amostra foram construídos entre 1882 e 2017, predominantemente no final do século XX e início deste século. Em cerca de 27% dos casos não foi disponibilizado o ano de construção. Cerca de metade dos reservatórios para os quais foi indicada a data de construção, foram construídos após o ano 2000, isto é, têm menos de 20 anos de funcionamento (Figura 1).

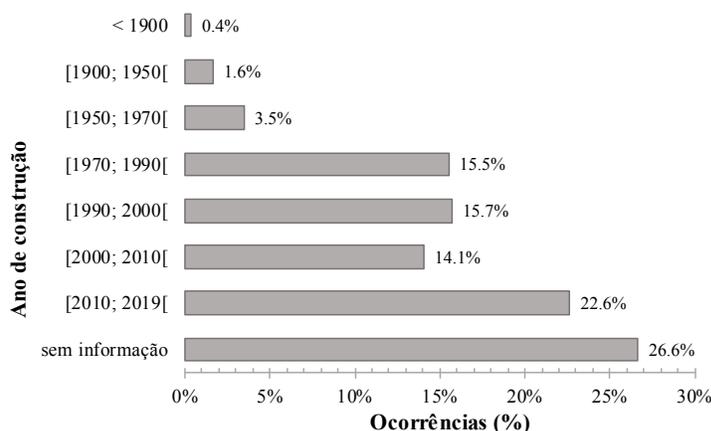


Figura 1 | Distribuição dos anos de construção dos reservatórios da amostra.

Características estruturais e operacionais

Na amostra predomina a geometria circular (74%), seguida da retangular (14%), da tronco-cônica (8%) e da quadrangular (4%). As células são maioritariamente apoiadas (50%), havendo cerca de 39% de células semienterradas, 10% de elevadas e apenas 1% de células enterradas (Figura 2).



Figura 2 | Exemplos de tipologias de reservatórios: (a) elevado; (b) apoiado.

A existência de septos é mais frequente em células com formato retangular do que nas restantes geometrias (Figura 3). Estas estruturas tornam o fluxo da água no interior dos reservatórios num escoamento do “tipo pistão”, isto é, a água tem de seguir um percurso desde a entrada até à saída, o que minimiza a mistura da água existente com a que entra em cada ciclo de enchimento. Em nenhuma das células deste estudo existem dispositivos de mistura ativa, como sejam agitadores.

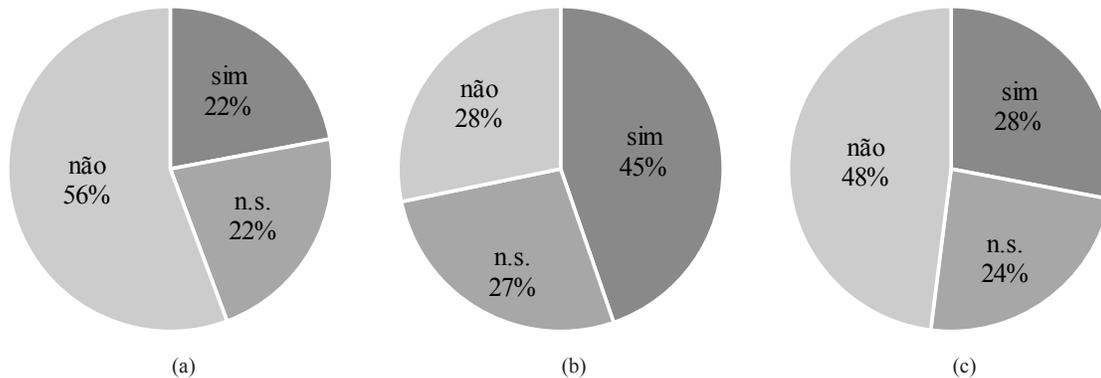


Figura 3 | Existência de septos nas células (a) circulares, (b) retangulares e (c) quadrangulares.

Cerca de 92% das células da amostra possuem apenas uma entrada de água, 5% têm duas entradas e para 3% não foi disponibilizada esta informação. A entrada de água faz-se maioritariamente por cima (80%), verificando-se entradas por baixo (afogadas) em 12% dos casos. Para 7% das células não é conhecida a localização da(s) conduta(s) de entrada e para apenas 2% a entrada de água faz-se e meio da célula. Os diâmetros das condutas de entrada variam entre 50 e 1 200 mm, com mediana de 300 mm.

Células enterradas, semienterradas e apoiadas

As células de geometria retangular e quadrangular apresentam, de uma forma geral, as maiores capacidades de armazenamento, variando entre 40 e 10 000 m³, com mediana de 2350 e 3000 m³, respetivamente. As células circulares têm tipicamente capacidades inferiores, sendo a mediana de 500 m³. Contudo, verifica-se que existem células circulares com volumes bastante significativos, com um máximo de 13 350 m³ (Tabela 1 e Figura 4).

Tabela 1 | Caracterização das células de tipologia enterrada, semi-enterrada e apoiada.

Geometria	Número de elementos (células)	Volume (m ³) [mín, máx] (med)	Rácio H/D (-) [mín, máx] (med)	Rácio H_{\min}/H_{\max} (%) [mín, máx] (med)
circular	425	[15; 13 350] (500)	[0.04; 1.85] (0.29)	[7; 100] (60)
retangular	85	[50; 10 000] (2350)	[0.06; 1.02] (0.17)	[26; 97] (70)
quadrangular	22	[40; 7 865] (3000)	[0.10; 0.85] (0.20)	[46; 89] (72)

As células apresentam valores medianos para o rácio altura/diâmetro (ou altura/diâmetro equivalente) de 0.17 a 0.29, respetivamente para as células de geometria retangular e circular (Figura 4), isto é, o diâmetro é muito superior à altura, o que confere aos reservatórios a aparência achatada. No entanto, nas células circulares este rácio toma valores muito distintos, variando entre 0.04 e 1.85. De uma forma geral, o rácio H/D diminui com o volume das células, tomando valores superiores a 1.0 em reservatórios de capacidade inferior a 200 m³ (Figura 5). É nas células dos maiores volumes (superiores a 3 000 m³) que H/D atinge os valores mais baixos, inferiores a 0.2.

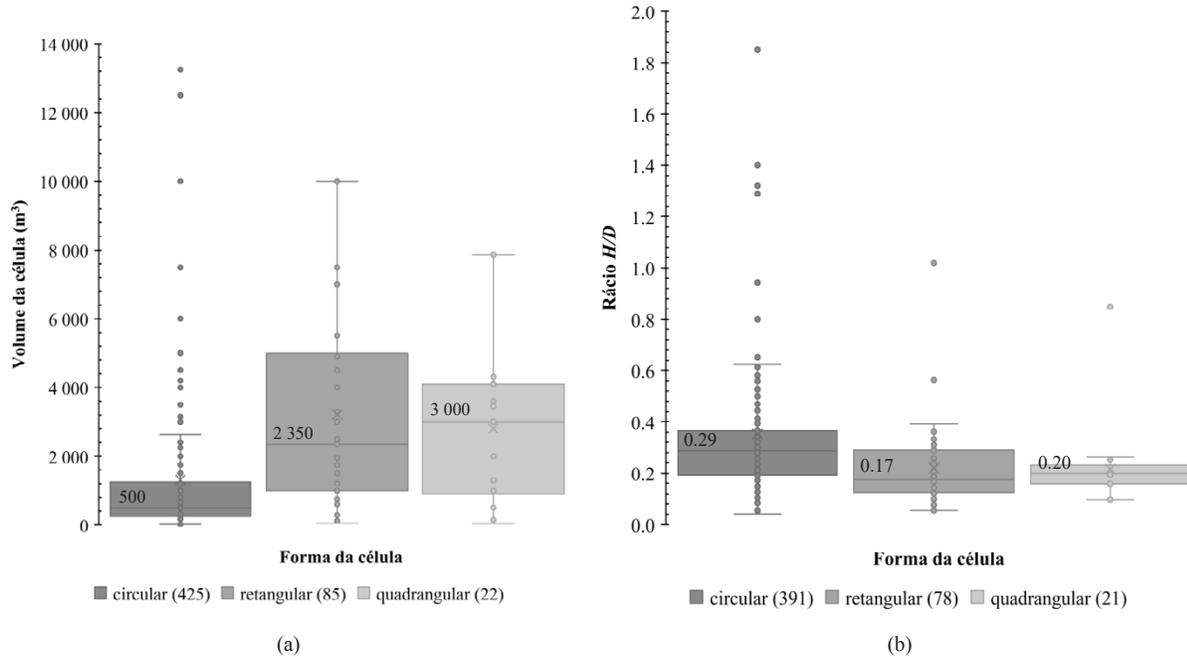


Figura 4 | Distribuição de (a) volume e (b) rácio H/D das células enterradas, semi-enterradas e apoiadas.

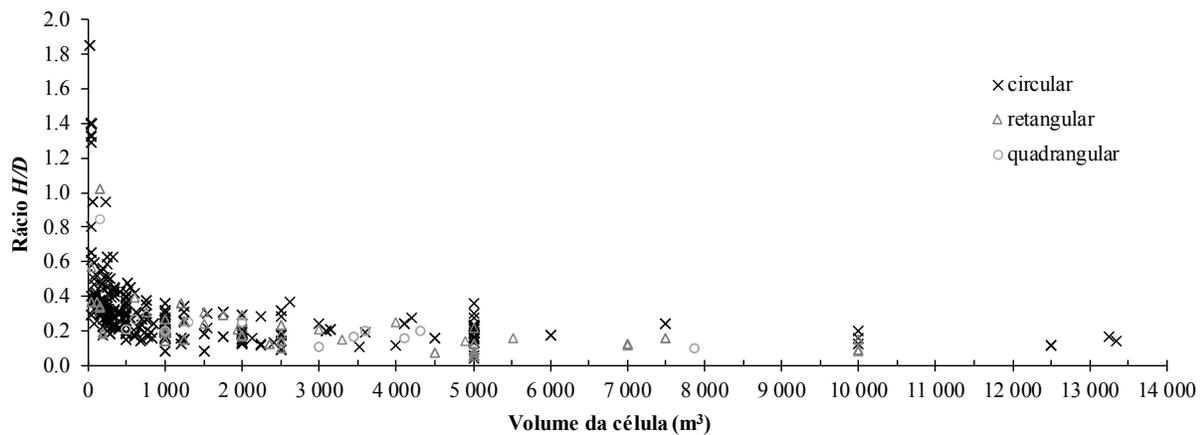


Figura 5 | Variação do rácio H/D com o volume para as células enterradas, semi-enterradas e apoiadas.

Ao contrário de H/D , que é um parâmetro de avaliação das dimensões relativas da infraestrutura, o rácio H_{\min}/H_{\max} , definido como a razão das alturas mínimas e máximas de operação dos reservatórios, permite avaliar a forma como estes são explorados. Os resultados mostram que este rácio é muito variável nas células circulares e que varia menos nas retangulares (Tabela 1). Contudo, os valores medianos deste rácio mostram que os níveis mínimos tendem a ser 60 a 72% dos níveis máximos, ou seja, os reservatórios são operados tendencialmente cheios para assegurar uma maior fiabilidade do sistema.

Células elevadas

O conjunto de células elevadas que compõem a amostra (61) é bastante mais pequeno do que o conjunto de células apoiadas, enterradas e semienterradas (532). As células elevadas têm, em geral, menor capacidade e são predominantemente de geometria tronco-cónica (Tabela 2). As capacidades de armazenamento variam entre 50 e 769 m^3 , com valores medianos de 300 a 405 m^3 para as células circulares e tronco-cónicas, respetivamente. O rácio H/D desta tipologia de células varia entre 0.26 e 1.12, com

mediana de 0.39 e 0.57 para as células elevadas circulares e quadrangulares respetivamente. Estes valores medianos, superiores aos verificados nas células apoiadas, enterradas e semienterradas, devem-se aos menores volumes de armazenamento nesta tipologia de células.

O rácio H_{min}/H_{max} não foi calculado para todas as células por falta de dados. Contudo, o valor mediano estimado de 38% indica uma maior variabilidade dos níveis de água nestas células do que nas das restantes tipologias.

Tabela 2 | Caracterização das células de tipologia elevada.

Geometria	Número de elementos (células)	Volume (m ³) [mín, máx] (med)	H/D (-) [mín, máx] (med)	H_{min}/H_{max} (%) [mín, máx] (med)
circular	15	[100; 600] (300)	[0.26; 1.12] (0,39)	[19; 79] (38)
quadrangular	3	[50; 405] (405)	[0.30; 0.57] (0,57)	n.d.
tronco-cónica	43	[150; 769] (313)	-	n.d.

Tempo de mistura

O tempo de mistura (Equação 1) foi estimado para 244 células circulares, para as quais foram disponibilizados todos os dados necessários (Figura 6). Os resultados mostram que o tempo de mistura varia entre 0.3 e 51 h, predominando tempos de mistura entre 1 e 2 h (25%). Em apenas 1.2% dos casos foram estimados tempos de mistura superiores a um dia. De notar que, para garantir a mistura da água que entra com a existente no reservatório, o tempo de enchimento deverá ser superior ao tempo de mistura, o que na prática não é exequível para grande parte dos casos.

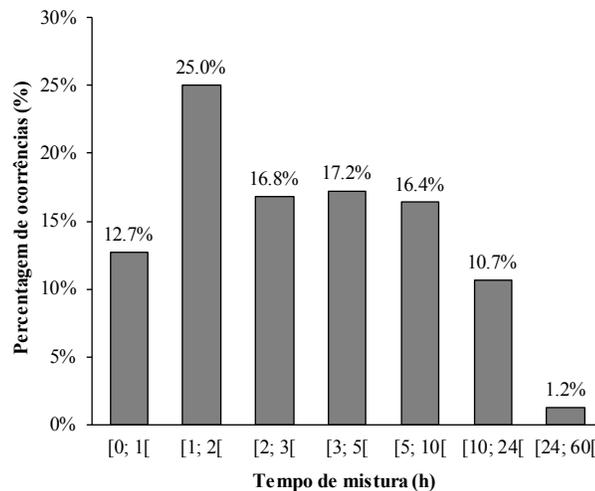


Figura 6 | Distribuição dos tempos de mistura nas células circulares.

De uma forma geral, nas células de menor volume, o aumento do caudal de entrada traduz-se em tempos de mistura baixos (Figura 7). Por outro lado, os maiores tempos de mistura observam-se nas células de elevado volume (>7000 m³) abastecidas por caudais de entrada baixos (<100 m³/h). Observa-se também que os tempos de mistura mais elevados correspondem a reservatórios com condutas de entrada de diâmetro relativamente largo (500 a 800 mm), o que se traduz em jatos de entrada com baixo fluxo de quantidade de movimento. Estes reservatórios, de elevado volume, baixo caudal de entrada e elevado diâmetro de conduta de entrada, reúnem as condições mais desfavoráveis à mistura da água. As alternativas de intervenção mais adequadas para estes reservatórios, com vista à melhoria das condições de mistura, devem ser estudadas no futuro, por exemplo, através da modelação numérica da hidrodinâmica do escoamento (CFD na sigla em inglês).

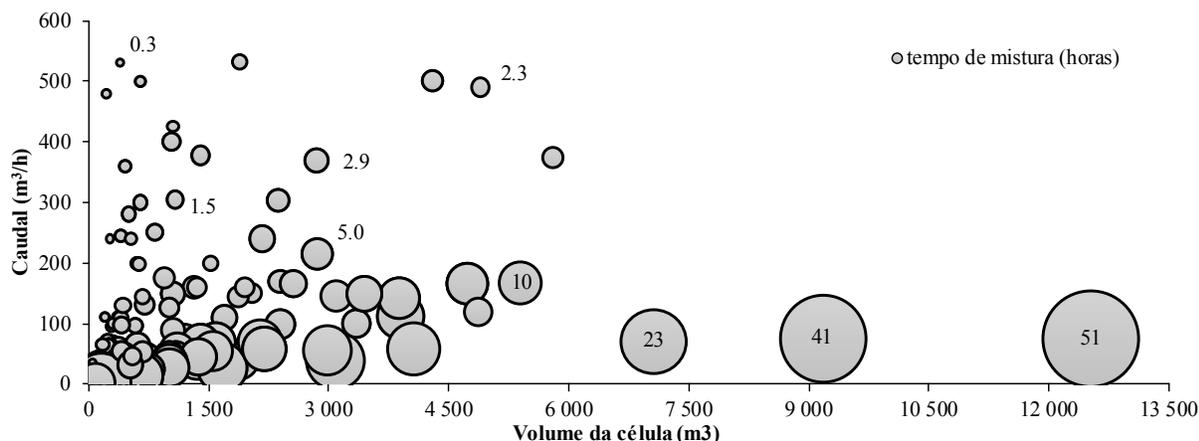


Figura 7 | Relação entre o tempo de mistura, o caudal de entrada e o volume da célula em reservatórios circulares.

De notar que os tempos de mistura apresentados referem-se ao tempo que um traçador demora a atingir uma concentração homogênea no reservatório e que o seu cálculo não tem em conta o efeito que a configuração (localização e posição das condutas de entrada) possa ter na dispersão do contaminante. Contudo, o tempo de mistura calculado poderá ser usado como um indicador do quão propícia poderá ser a mistura nestas células, tendo em conta as suas dimensões e o fluxo de quantidade de movimento do jato de entrada.

Fração de volume de renovação

Ao contrário do tempo de mistura, a fração de volume de renovação ($\Delta V/V_{min}$) calculada para células circulares pode ser comparada com valores teóricos, uma vez conhecidos os níveis de operação e o diâmetro da conduta de entrada (Figura 8). Desta forma é possível avaliar se as condições de operação atual permitem a mistura completa da água que entra em cada ciclo de enchimento com a existente na célula. Os resultados mostram que, em 74% dos casos, as condições de operação permitem que o volume de água que entra em cada ciclo de enchimento se misture com a água existente. De notar que estes resultados são obtidos admitindo que o nível de água no interior do reservatório varia entre o nível mínimo operacional reportado pelas entidades gestoras e o nível máximo em cada ciclo de enchimento. Na prática, é comum observarem-se variações de nível menores e variáveis no tempo, consoante os consumos de água de jusante e as necessidades de reserva. É ainda de salientar que o rácio H_{min}/H_{max} nas células em que é atingida a mistura é, em média, de 49% e que nas células onde não é atingida a mistura, o mesmo rácio varia entre 70 e 96%, com um valor médio de 84%. Estes resultados mostram o efeito da variação dos níveis na mistura da água.

Por outro lado, verifica-se que a mistura é alcançada em quase todas as células circulares com diâmetros de entrada de 200 mm, uma vez que as frações de volume de renovação calculadas são superiores às mínimas para garantir mistura (Figura 8). O mesmo não se verifica nas células com diâmetros de entrada maiores (500 mm), cujas frações de volumes de renovação são inferiores às mínimas necessárias em 59% dos casos. Nestas, o fluxo de quantidade de movimento do jato é menor e é necessário aumentar a fração de volume de renovação em cada ciclo para garantir a mistura, para um mesmo volume inicial. Estes resultados mostram que é nos reservatórios com os maiores diâmetros nas condutas de entrada que se observam os piores desempenhos, ou seja, onde as condições de operação não permitem a mistura da água no seu interior, prevendo-se a criação de zonas de estagnação com maiores tempos de residência da água. A diminuição do diâmetro da conduta de entrada poderá ser uma medida prática com benefício para a mistura e consequentemente para a qualidade da água.

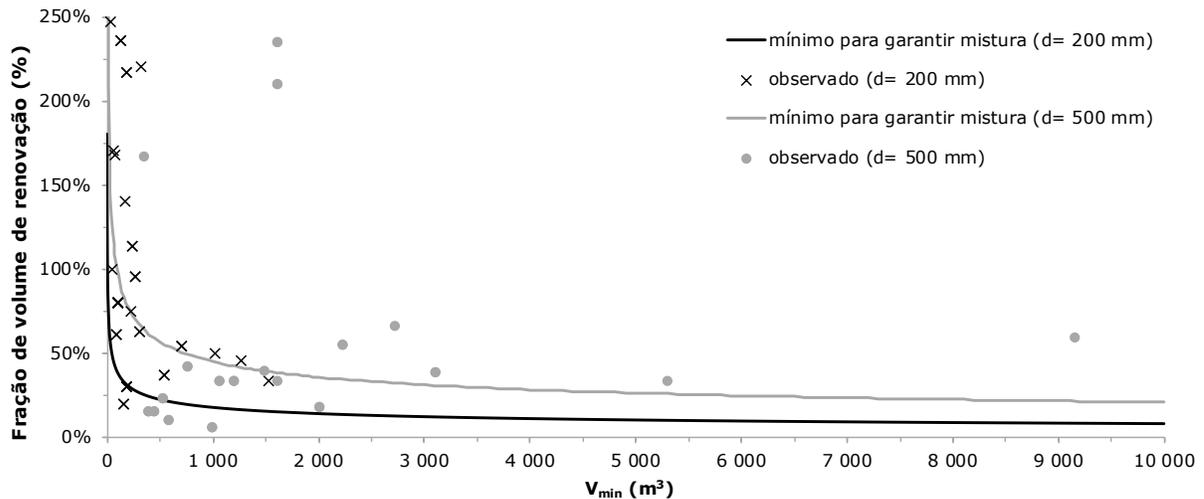


Figura 8 | Comparação das frações de volume de renovação necessárias para garantir a mistura com as observadas.

CONCLUSÕES

Os reservatórios de água para consumo humano existentes em Portugal apresentam tipologias e dimensões muito variáveis, sendo mais frequente encontrar-se geometrias retangulares e quadrangulares em reservatórios de grandes dimensões e geometrias circulares em reservatórios de menor capacidade. Os reservatórios são operados tendencialmente cheios, isto é, a variação de nível num ciclo de enchimento é reduzida, sendo o rácio H_{min}/H_{max} mediano de 60 a 70%. Pela primeira vez foram estimados tempos de mistura nos reservatórios portugueses, verificando-se que são predominantemente da ordem de 1 a 2 h. Em mais de 70% da amostra, o volume de água restituído ao reservatório em cada ciclo de enchimento é suficiente para misturar completamente a água que entra com a já existente na célula. Contudo, em muitos destes reservatórios esta mistura só é possível quando o nível de água varia entre o mínimo operacional e o máximo num só ciclo de enchimento.

O estudo mostra também que algumas entidades gestoras desconhecem características estruturais e operacionais dos seus reservatórios, o que enfatiza a necessidade de criar e manter atualizadas bases de dados com os registos das principais características.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação para a Ciência e a Tecnologia pelo financiamento do projeto PTDC/ECI-EGC/32102/2017 IMIST – “Melhorar a mistura em reservatórios para o abastecimento de água mais seguro” e pela atribuição da bolsa de doutoramento PD/BD/135214/2017. É também devido um agradecimento especial a todas as entidades gestoras de serviços de águas portuguesas que colaboraram neste estudo.

NOMENCLATURA

ΔV	Volume de água adicionado na fase de enchimento
t_m	Tempo de mistura
τ_m	Tempo de mistura adimensional
V_{min}	Volume mínimo
d	Diâmetro da conduta de entrada

D	Diâmetro da célula
D_{eq}	Diâmetro equivalente
H	Altura de água
H_{min}	Altura mínima operacional
H_{max}	Altura máxima operacional
M	Fluxo de quantidade de movimento (para massa volúmica unitária)

REFERÊNCIAS

- Chuo, P.Y., Ball, J.E., Fisher, I.H. 2003. Thermal stratification in drinking water service reservoirs. *Australasian Journal of Water Resources*, 6(2), 159-167. <https://doi.org/10.1080/13241583.2003.11465219>
- Cherchi, C., Badruzzaman, M., Oppenheimer, J., Bros, C.M., Jacangelo, J.G. 2015. Energy and water quality management systems for water utility's operations: A review. *Journal of Environmental Management*, 153, 108-120. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.01.051>
- Clark, R.M., Abdesaken, F., Boulos, P.F., Mau, R.E. 1996. Mixing in Distribution System Storage Tanks: Its Effect on Water Quality. *Journal of Environmental Engineering*, 122(9), 814-821. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(1996\)122:9\(814\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(1996)122:9(814))
- Grayman, W.M., Rossman, L.A., Deininger, R.A., Smith, C.D. Smith, Arnold, C.N., Smith, J.F. 2004. Mixing and ageing of water in distribution system storage facilities. *Journal of the American Water Works Association*, 96(9), pp. 70-80. <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.2004.tb10704.x>
- McCormick, G., Powell, R. 2003. Optimal Pump Scheduling in Water Supply Systems with Maximum Demand Charges. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 129(5), 372-379. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(2003\)129:5\(372\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2003)129:5(372))
- Nordblom O., Bergdahl, L. 2004. Initiation of Stagnation in Drinking Water Storage Tanks. *Journal of Hydraulic Engineering*, 130(1), 49-57. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2004\)130:1\(49\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2004)130:1(49))
- Rossman, L.A. 2000. EPANET 2 User's Manual. Cincinnati, USA: U. S. Environmental Protection Agency, 2000.
- Rossman, L.A., Grayman, W.M. 1999. Scale-Model Studies of Mixing in Drinking Water Storage Tanks. *Journal of Environmental Engineering*, 125(8), 755-761. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(1999\)125:8\(755\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(1999)125:8(755))
- Tian, X., Roberts, P.J.W. 2008a. Mixing in water storage tanks. I: No buoyancy effects. *Journal of Environmental Engineering*, 134(12), 974-985. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(2008\)134:12\(974\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(2008)134:12(974))
- Tian, X., Roberts, P.J.W. 2008b. Mixing in water storage tanks. II: with buoyancy effects. *Journal of Environmental Engineering*, 134(12), 986-995. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(2008\)134:12\(986\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(2008)134:12(986))
- Zhang J. 2012. Passive and Active Methods for Enhancing Water Quality of Service Reservoir. *Journal of Hydraulics Engineering*, 139(7), 745-753. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000730](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000730)