



DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

ESTUDO DA TURVAÇÃO EM REDE DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA A ALTA PRESSÃO NO GRANDE PORTO

TIAGO ANDRÉ MOREIRA CARNEIRO

Mestrado em Engenharia Química
Ramo Tecnologias de Proteção Ambiental
Novembro 2013

Agradecimentos

Apesar de este trabalho ser um trabalho individual e para finalidade académica, existem agradecimentos que não podem deixar de ser mencionados. Este grande passo tem que ser partilhado com todos aqueles que ajudaram direta e indiretamente na sua concretização e conclusão. A todas essas pessoas gostaria de demonstrar o meu muito e enorme obrigado, nomeadamente:

- ❖ Ao Professor Christopher de Sá, meu orientador nesta tese de mestrado, por toda a sua colaboração e ajuda, pela sua motivação, pelos seus alertas de falhas e mensagens positivas, que me ajudaram e ultrapassar momentos de bloqueio;
- ❖ Ao Eng.º José Carlos Rodrigues e à Engª Rita Reis, colaboradores da empresa Águas do Douro e Paiva (AdDP), pela sua disponibilidade, apoio, e fornecimento de informação;
- ❖ À empresa Águas do Douro e Paiva (AdDP), por ter concedido esta oportunidade e pelo fornecimento de todos os meios para a sua realização. A todos os seus membros que contribuíram anonimamente para obtenção de alguns dados importantes;
- ❖ Ao Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP) bem como todos os docentes que contribuíram para a minha formação académica e conhecimentos transmitidos;
- ❖ Aos meus pais, ao meu irmão, aos meus avós e restante família, por todos estes anos de sacrifício, compreensão, esforço, apoio e motivação que exerceram ao longo de todas as fases da minha vida e fizeram de mim o que sou hoje;
- ❖ À minha namorada, conselheira, melhor amiga e companheira, Isa Pereira, por todo amor e carinho, por seres um suporte enorme para mim, e por todas as tuas palavras de motivação diárias e me ouvires constantemente, que me fortaleceram ao longo deste período e me ajudaram a lutar pela finalização desta enorme etapa. Porque sem ti, certamente, não seria capaz.
- ❖ Aos meus colegas e amigos, por todos os momentos que passamos juntos.

Resumo

A turvação é uma das principais preocupações das empresas de rede de distribuição de água potável. Para se saber a sua origem existem diversos mecanismos, sugeridos em bibliografia, que explicam a formação de depósitos de partículas nas tubagens, que se acumulam em camadas sobrepostas, criando entre si forças de coesão. A turvação pode surgir se o caudal ou a velocidade na tubagem aumentar, por alguma razão, pois um aumento da tensão de corte sobre o depósito, pode superar as forças de coesão levando à sua ressuspensão. Esta explicação é traduzida matematicamente pelo modelo PODDS (*Prediction of Discolouration in Drinking Water Distribution System*).

O modelo PODDS foi compilado em EPANET recentemente por uma equipa de investigadores da Universidade de Sheffield e foi utilizado para fazer o estudo num ramal da empresa AdDP - Águas do Douro e Paiva, SA. Os resultados das simulações permitirão prever o caudal mínimo teórico a utilizar no ramal que origina o valor limite de turvação.

Foram realizados ensaios de variação do caudal no ramal de Jovim-Ramalde para a calibração do modelo. Os parâmetros obtidos foram: $C_{máx}$ igual a 100 NTUm, b e n igual a 1, k é igual $-1 \text{ NTUm}^3/\text{N}$, e por fim, P igual a $0,0001 \text{ NTUm}^3/\text{N.s}$. Após calibração do modelo realizaram-se simulações com atualização das forças de coesão para conhecer o caudal que provocaria a mobilização das partículas até uma turvação de 4 NTU e concluiu-se que o valor seria de $4,32 \text{ m}^3/\text{s}$. O tempo necessário para regressar a valores inferiores a 1 NTU também foi determinado e 4 horas e 8 minutos foi o valor alcançado. Por fim realizou-se um estudo da influência da temperatura neste modelo e o resultado mostrou que este parâmetro é pouco influente para a gama de temperaturas considerada.

Palavras-chave: EPANET, Turvação, PODDS, Modelação de qualidade em redes de distribuição de água.

Abstract

Turbidity is one major concern of the distribution network of drinking water supply companies. In order to know its origin there are various mechanisms suggested in literature that explain the formation of deposits of particles in pipes, which accumulate in overlapping layers, creating cohesive forces between them. The turbidity may arise if the flow rate or velocity on the pipe increases for some reason, because an increase on the shear stress over the deposit can overcome the cohesive forces leading to its resuspension. This explanation is given translated by the mathematical model PODDS (*Prediction of Discolouration in Distribution Drinking Water System*).

The model PODDS was built in EPANET recently by a team of Sheffield University researchers led by Joby Boxall and was used to study an extension of the company AdDP- Douro and Paiva Waters, S.A. The results of the simulations will allow predict the minimum flow to be use on the main without this exceeds the limit value of turbidity.

Trials were performed varying the flow rate of the main Jovim-Ramalde to calibrate the model. The parameters obtained were: C_{\max} equal to 100 NTUm, b and n equal to 1, k is equal $-1 \text{ NTUm}^3 / \text{N}$ and, finally, P equal to $0.0001 \text{ NTUm}^3 / \text{N.s}$. After calibration the model were carried out simulations with the updates of cohesive forces to get to know the flow that would trigger the mobilization of particles to a turbidity on the order of 4 NTU, it was concluded that the pipeline would have to be working with a flow rate of $4,32 \text{ m}^3/\text{s}$. The time required to return to values below 1 NTU was also determined and 4 hours and 8 minutes value was reached. Finally we carried out a study of the influence of temperature on this model and the result showed that this parameter is little influential for the temperature range considered.

Keywords: EPANET, Turbidity, PODDS, modeling quality in water distribution systems.

Índice

Índice de Figuras	vii
Índice de Tabelas	ix
1. Introdução	1
1.1. Enquadramento Histórico	2
2. Controlo de Qualidade da Água Potável de Abastecimento Público	5
2.1. Definição de Turvação	5
2.2. Efeito e Prejuízos Associados à Turvação na Água	6
2.3. Ressuspensão do depósito numa tubagem	7
3. Modelação e Simulação da Turvação em Sistemas de Distribuição	9
3.1. EPANET 2.0	9
3.2. Procedimento de utilização do EPANET 2.0	11
3.3. Modelo EPANET/PODDS	11
3.4. Dificuldades do Modelo PODDS	15
3.5. Calibração do Modelo	15
3.6. Desenvolvimentos Recentes sobre modelação de formação e ressuspensão de depósitos em tubagem	16
3.7. Método RPM – Método Potencial de Ressuspensão	18
4. Metodologia Aplicada	21
4.1. Dados disponíveis	21
4.2. Ensaios para calibração do modelo PODDS	22
4.3. Obtenção dos Parâmetros de Modelo	25
5. Discussão de Resultados	33
5.1. Parâmetros obtidos no modelo PODDS	33
5.2. Estimativas do caudal mínimo que origina o valor limite de turvação e do Tempo de retorno à turvação inicial, no ramal Jovim-Ramalde	39
5.3. Influência da Temperatura	40
6. Conclusão	43
Bibliografia	45
Anexos	47
Anexo A – Imagem Representativa da 1ª Folha de Cálculo em Excel	57
Anexo B – Imagem Representativa da 2ª Folha de Cálculo em Excel	59
Anexo C – Exemplo do conteúdo de um Ficheiro INP, da adutora Jovim-Ramalde	61

Anexo D – Conteúdo de um ficheiro de calibração, para o ponto de recolha de Ramalde.....	64
--	----

Índice de Figuras

Figura 1-1 – Imagem Representativa de Aqueduto (Mascarenhas, 2011).	3
Figura 2-1 – Água turva e com cor (Vreeburg, et al., 2007).	5
Figura 2-2 – Estudo realizado pela DWI, (a) incidentes investigados (b) causas dos incidentes com turvação (Husband, et al., 2011).	6
Figura 2-3 – Processos Físicos que provocam a formação de água turva (adaptado de (Vreeburg, 2009))	7
Figura 3-1 – Força de Coesão vs Turvação (Boxal, et al., 2005).	13
Figura 3-2 – Evolução temporal da turvação após mudança de velocidade na tubagem	19
Figura 4-1 – Subsistema Lever Norte que contém o grupo de adutoras Ramalde - Cabanas – Pedrouços.	21
Figura 4-2 – Turbidímetro Portátil Hach 2100 Qis.	23
Figura 4-3 – Turbidímetro Online <i>MicroTol</i>	23
Figura 4-4 – Data Logger Monarch Data Chart	24
Figura 4-5 – Imagem Representativa de uma “picagem”.	24
Figura 4-6 – Diagrama da Metodologia de Calibração do Modelo em Excel.	25
Figura 4-7 – Imagem Representativa do Gráfico C versus τ_t , para os parâmetros $C_{máx} = 100$ e $k = -1$	28
Figura 4-8 – Diagrama da Metodologia de Calibração do Modelo proposto por Dr. <i>Stewart Husband</i>	29
Figura 4-9 – Adutora Jovim – Ramalde desenhada em EPANET.	30
Figura 4-10 – <i>Pattern</i> de caudal utilizado em EPANET 2.00.07 bTB2.	31
Figura 4-11 – Exemplo do gráfico de uma boa calibração, com os valores obtidos na simulação (a vermelho) e valores registados em campo (a verde).	32
Figura 5-1 – Evolução dos valores de turvação e caudal registados nos dois pontos de recolha durante o ensaio de campo.	34
Figura 5-2 – Evolução C ($NTUm^3$) vs τ'_a , dos dados recolhidos a 1400m.	35
Figura 5-3 – Evolução C ($NTUm^3$) vs τ'_a , dos valores recolhidos em Ramalde.	35
Figura 5-4 – Evolução C ($NTUm^3$) vs τ'_a dos valores recolhidos a 1400 m.	36
Figura 5-5 – Evolução C ($NTUm^3$) vs τ'_a dos valores recolhidos em Ramalde.	37
Figura 5-6 – Evolução da turvação ao longo do tempo no ponto de recolha a 1400 m de Jovim após funcionamento da 3ª bomba ($9500 m^3/h$) durante 15-20 minutos na adutora Jovim-Ramalde.	38
Figura 5-7 – Evolução da Turvação ao longo do tempo no ponto de recolha de Ramalde após funcionamento da 3ª bomba ($9500m^2/h$) durante 15-20 minutos na adutora Jovim-Ramalde.	38
Figura 5-8 – Evolução temporal da turvação simulada para um caudal de $4,32 m^3/s$. ..	40
Figura 5-9 – Gráfico da turvação ao longo do tempo, para uma temperatura de $8^\circ C$, no ponto de recolha de Ramalde, após funcionamento da 3ª bomba ($9500m^2/h$) durante 15-20 minutos na adutora Jovim-Ramalde.	41
Figura 5-10 – Gráfico da turvação ao longo do tempo, para uma temperatura de $17^\circ C$, no ponto de recolha de Ramalde, após funcionamento da 3ª bomba ($9500m^2/h$) durante 15-20 minutos na adutora Jovim-Ramalde.	41

Figura 5-11 – Gráfico da turvação ao longo do tempo, para uma temperatura de 25°C, no ponto de recolha de Ramalde, após funcionamento da 3ª bomba (9500m ² /h) durante 15-20 minutos na adutora Jovim-Ramalde.....	41
Figura A-1 - Imagem Representativa da 1ª folha de cálculo em Excel.	57
Figura B-1 - Imagem Representativa da 2ª folha de cálculo em Excel.	59

Índice de Tabelas

Tabela 4-1 – Parâmetros propostos pelo Dr. <i>Joby Boxall</i> (Boxall, et al., 2009)	25
Tabela 5-1 – Parâmetros do modelo PODDS obtidos em folha de cálculo.	36
Tabela 5-2 – Parâmetros obtidos pela metodologia de Cálculo Criada.	37
Tabela 5-3 – Parâmetros do modelo PODDS obtidos pelo EPANET 2.00.07 bTB2.....	39

Nomenclatura

- A_t** – Área transversal da tubagem (m^2);
- b** – Termo que descreve a relação linear ou não linear entre a força de coesão e o potencial de turvação;
- C** – Potencial de turvação (NTUm);
- $C_{máx}$** – Potencial máximo de turvação (NTUm);
- D** – Diâmetro (m);
- f** – Fator de atrito (adimensional);
- g** – Constante de aceleração gravítica (m/s^2);
- hab** – Número de habitantes;
- h_D** – perda de carga ao longo do comprimento do tubo (m.c.a.);
- L** – comprimento do tubo (m);
- K** – rugosidade equivalente da parede do tubo (m);
- k** – Gradiente que descreve a relação entre a força de coesão e o potencial de turvação ($NTUm^3/N$);
- n** – Termo que relaciona a mobilização do material com a tensão de corte;
- NTU** – Unidade Nefelométrica de Turvação;
- P** – Coeficiente da força de erosão ($NTUm^3/N.s$);
- Q** – Caudal (m^3/s);
- Re** – número de *Reynolds* (adimensional);
- S_0** – Gradiente Hidráulico (adimensional);
- v** – velocidade (m/s);
- UJ** – Unidade de Jackson;
- τ** – Tensão de Corte (N/m^2);
- ρ** – Massa volúmica (kg/m^3);
- τ'_s** – Força de coesão (N/m^2);
- μ** – Viscosidade dinâmica da água $\approx 0,001$ kg/m.s;

Lista de Siglas

AdDP – Águas do Douro e Paiva, S.A.;

DWI –*Drinking Water Inspectorate (United Kingdom)*;

EPA – *Environmental Protection Agency*;

ETA – Estação de Tratamento de Água;

E.U.A. – Estados Unidos da América;

FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto;

GUI – Interface Gráfica do EPAnet;

ID – Identidade Digital;

ISEP – Instituto Superior de Engenharia do Porto;

PODDS – *Prediction of Discolouration in Drinking Water Systems*;

PVC – Policloreto de Vinilo;

RPM – *Resuspension Potencial Method*;

1. Introdução

A água é a nossa verdadeira riqueza, mais do que o ouro ou o petróleo, sendo essencial para todas as formas de vida na Terra. Ela é fonte de saúde e bem-estar, alimenta a vida, age como reguladora de temperatura, diluidora de sólidos, e transformadora de nutrientes e resíduos. Mas ninguém pensa nela nestes termos, porque nos é tão familiar, comum e quase indiferente.

Atualmente cerca de 1,5 mil milhões de indivíduos ainda não têm acesso a água potável e, anualmente, cerca de 7 milhões de pessoas, dos quais 2 milhões são crianças, morrem de doenças devidas à contaminação da água e/ou por não terem acesso a água potável (Capelle, 2007).

Neste quadro, as instalações de abastecimento de água potável são fulcrais e têm que ser capazes de fornecer água com qualidade e quantidade suficientes pensando sempre nas gerações presentes e futuras. Deste modo, todos os profissionais responsáveis pelo planeamento, projeto, implantação, operação, manutenção e gestão destas instalações devem ter essa realidade presente, e considerá-la nas suas atividades futuras (Heller, et al., 2006).

As diferentes etapas na distribuição de água potável, desde a sua captação até ao seu consumo, têm sido alvo de um forte desenvolvimento tecnológico ao longo dos anos de forma a garantir uma qualidade, de acordo com os requisitos legais. O conhecimento nesta área tem também crescido devido a estudos de caracterização, modelação e simulação sobre a qualidade da água ao longo dos processos de tratamento e dos sistemas da sua distribuição pela população.

No caso da modelação dos sistemas de distribuição de água, esta começou a ser utilizada para prever o comportamento de determinados compostos na avaliação da qualidade da água. Foi possível prever reações que esses compostos têm ao longo da rede de distribuição de água, como por exemplo na reação de formação de subprodutos de desinfecção. Em paralelo foram desenvolvidos modelos hidráulicos para poder determinar as características de bombagem, calcular perdas de pressão, etc. Um *software* de livre acesso que utiliza alguns destes modelos hidráulicos é o EPANET distribuído pela USEPA (*United States Environmental Protection Agency*).

Tudo isto tem vindo a facilitar a tarefa das empresas gestoras dos sistemas de distribuição de água, pois permite-lhes realizar simulações e prever e/ou antecipar possíveis avarias, necessidades de maiores consumos, etc.

Este trabalho visa compreender o fenómeno da acumulação de partículas no interior de um ramal de distribuição de água, em alta pressão, ao grande Porto, o seu potencial de provocar eventos de turvação, a sua modelação e validação. Os objetivos definidos foram:

- Estudar o fenómeno de deposição de partículas no interior de tubagens de uma rede de abastecimento de água potável;
- Encontrar uma forma de modelar o fenómeno da ressuspensão das partículas depositadas;
- Estimar o valor do caudal mínimo a partir do qual a turvação atinge os 4 NTU;
- Estimar o tempo necessário para a turvação diminuir de 4 NTU para um valor inferior a 1 NTU;
- Estudar a influência da temperatura no modelo.

1.1. Enquadramento Histórico

A qualidade da água é um assunto que preocupa as populações desde há vários milénios. Existem indícios que em 5000 a.C. havia métodos de tratamento de água para a agricultura e consumo humano na Mesopotâmia. Dois mil anos depois, já se utilizava sistemas de drenagem e coletores de esgotos na antiga Babilónia (Azevedo Netto, 1998).

Umas das civilizações mais evoluídas para o seu tempo foram os egípcios, continham um forte conhecimento cultural e científico e já tinham métodos de tratamento e de distribuição de água bastante evoluídos e plenamente funcionais. Em 2750 a.C. o faraó *Chéops* utilizou no seu palácio um sistema de canalizações em cobre e, em 2000 a.C., existem registos da utilização de sulfato de alumínio, filtração com carvão, areia e cascalho e outros métodos de aquecimento para purificar a água nesta civilização. 500 anos mais tarde inventaram o primeiro sistema de decantação para tratamento da água potável, no entanto, este povo nunca teve um sistema de abastecimento público de água (Resende, et al., 2002).

O primeiro sistema de abastecimento público de água surgiu na antiga Assíria, em 691 a.C, foi adotado e inovado mais tarde pelos gregos e, 300 anos depois, pelos romanos. Esta última civilização usou esta técnica e criou elaborados sistemas de distribuição de água nas suas cidades. Ao longo dos anos construíram-se vários aquedutos, semelhantes ao que se encontra representado na Figura 1-1, e muitas dessas construções ainda hoje existem. Em 70 a.C, este povo formou a primeira entidade gestora da água potável e construiu o maior aqueduto, em Roma, o que permitiu assegurar a qualidade de água. No século III d.C. esta entidade continha 247 reservatórios de água, 11 termas, 926 banheiros públicos e 1212 chafarizes (Bono, 1975).



Figura 1-1 – Imagem Representativa de Aqueduto (Mascarenhas, 2011).

Até ao século XIII não houve grandes alterações nesta matéria, sendo que o consumo médio de água na Europa se manteve constante em 1L/hab/dia. A partir daí, o consumo de água foi aumentando e o número de sistemas de água igualmente. Mais tarde apareceram os tubos em cerâmica e em 1664 foram utilizados tubos de ferro fundido, por *Johan Jordan*, no palácio de Versalhes. A primeira estação de tratamento de água (ETA) surge em 1804, na Escócia, e 14 anos depois em Londres.

Nunca tinha sido provado que a água pública podia ser fonte de contaminação para os humanos, mas em 1854 com um estudo realizado pelo Dr. *John Snow* na cidade de Londres, verificou-se que a epidemia de cólera se espalhava através da água, pois havia diferenças entre as zonas abastecidas por sistemas de distribuição com água contaminada por esgotos e outras não (Azevedo Netto, 1998). Este problema foi resolvido pelo Dr. John utilizando, pela primeira vez, cloro como desinfetante. Mas só em 1897 é que o cloro foi utilizado como desinfetante pelo Dr. Snow num sistema de distribuição de água potável (Pedley, et al., 2003).

Entre 1840 e 1920 foram inventados os tubos de borracha vulcanizada, os tubos de aço, os de betão e os de cimento e amianto. Em 1908, em New Jersey, voltou-se a utilizar o cloro como desinfetante dos sistemas de distribuição e em 1936, na Alemanha, foi inventado e implementado uma rede experimental em tubos de PVC (Azevedo Netto, 1998).

Entre 1945 e 1980 as redes de distribuição de água aumentaram substancialmente e passou a haver uma preocupação com a sua idade, o seu desgaste, e o aspeto da água no cliente final. Em países como Alemanha, Holanda e Austrália, as redes começaram a ser substituídas por tubagens de PVC, aço e betão, enquanto em Inglaterra, por não haver grandes investimentos, as tubagens mantiveram-se em ferro fundido e hoje há bastantes com mais de 100 anos de idade. Estas tubagens sofrem diariamente um desgaste físico, libertando partículas de ferro e aumentando a turvação e/ou coloração da água - água férrea (Resende, et al., 2002).

Em 1980 foi desenvolvido o primeiro modelo de avaliação da qualidade da água em sistemas de distribuição com formulações de *Don Wood*, da Universidade de Kentucky, e por vários investigadores da EPA, em *Cincinnati, Ohio*.

Em meados da década de 90 realizaram-se alguns estudos sobre o aspeto final da água potável e verificou-se que muitos clientes manifestaram queixas sobre a presença de turvação e cor. Estas inconformidades podiam prover da existência de corrosão, areia ou matéria orgânica existente na própria água, ou ainda de resíduos dos reagentes usados nas estações de tratamentos de água que levaria à formação de depósitos nas tubagens e posterior ressuspensão. Por isso, muitos países muniram-se de fortes políticas preventivas e legislativas, onde referem valores limite para certos elementos constituintes da água (Vreeburg, et al., 2007).

2. Controlo de Qualidade da Água Potável de Abastecimento Público

O objetivo de um sistema de distribuição de água potável é entregar suficiente quantidade de água com qualidade. Esta qualidade pode ser aceitável quando a água sai da ETA, mas pode sofrer transformações à medida que viaja pelo seu sistema de distribuição.

No passado os sistemas de distribuição de água eram desenhados e operados com o objetivo de uma grande fiabilidade hidráulica e prestando pouca atenção à qualidade da água, mas esta atitude mudou à medida que várias empresas gestoras se aperceberam da influência do tempo de trajeto neste parâmetro (Mays, 2000). Durante este trajeto a água contacta com depósitos que estão acumulados nas tubagens e pode alterar a sua cor ou simplesmente pode ressuspendê-los causando turvação, como podemos ver na Figura 2-1 (Husband, et al., 2008).



Figura 2-1 – Água turva e com cor (Vreeburg, et al., 2007).

2.1. Definição de Turvação

A turvação da água deve-se à presença de material em suspensão finamente dividido tais como argilas, metais, grãos de areia, matéria orgânica, etc. Este parâmetro organolético é uma medida não específica da concentração das matérias em suspensão e varia com o número, tamanho e tipo do material em suspensão.

Esta turvação será tanto menor quanto mais eficiente for o tratamento da água bruta, por isso é importante um adequado controlo na determinação da eficiência dos tratamentos em ETA (Mendes, et al., 2004).

O processo usado como método de referência para a sua quantificação baseia-se na medida óptica da dispersão da luz ao atravessar uma coluna de água, também denominado de turbidimetria, medidas em Unidades *Jackson* (UJ). Esta unidade é equivalente a uma Unidade Nefelométrica (1 NTU), resultante da medição da densidade óptica em espectrofotómetros ou aparelhos equivalentes, em regra, a 580 nm. Pode-se ainda recorrer ao efeito de *Tyndall*, ao observar um líquido turvo quando este é atravessado por um feixe luminoso de forte intensidade (The Oregon Plan for Salmons and Watersheds, 1999).

2.2. Efeito e Prejuízos Associados à Turvação na Água

O consumidor reage negativamente à presença de turvação ou material em suspensão na água, recusando o seu consumo. Por exemplo, em Inglaterra e País de Gales a turvação foi considerada o principal problema de qualidade apresentado à empresa de gestão do transporte de água potável. Num estudo realizado em 2007 verificou-se que 80%, de um total de 154.985 queixas de clientes, foram sobre água com turvação. E ainda nesse mesmo ano, 33% de todos os incidentes investigados pela DWI no Reino Unido foram devido a turvação, como se pode observar na Figura 2-2 (Husband, et al., 2011).

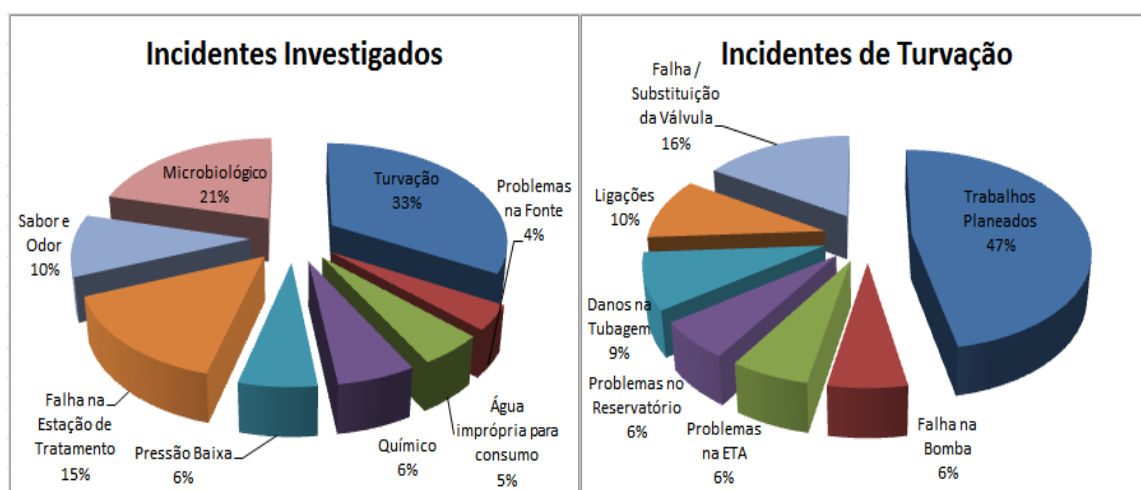


Figura 2-2 – Estudo realizado pela DWI, (a) incidentes investigados (b) causas dos incidentes com turvação (Husband, et al., 2011).

Geralmente não são as partículas em suspensão que trazem os riscos sanitários, mas sim os contaminantes microbiológicos que se encontram protegidos da ação dos desinfetantes. A matéria orgânica pode ser suficiente para neutralizar a ação dos desinfetantes facilitando a sobrevivência dos microrganismos. Outro problema a destacar é a formação de subprodutos da desinfecção que têm características tóxicas para o ser humano (Mendes, et al., 2004).

2.3. Ressuspensão do depósito numa tubagem

Nas redes de distribuição pode ocorrer turvação e coloração da água, como se pode ver na Figura 2-3, devido à ressuspensão de depósitos existentes nas tubagens provenientes de processos de corrosão, coagulação e floculação ou acidentes ocorridos na rede que levem a infiltrações exteriores à rede ou à ETA (Mendes, et al., 2004).

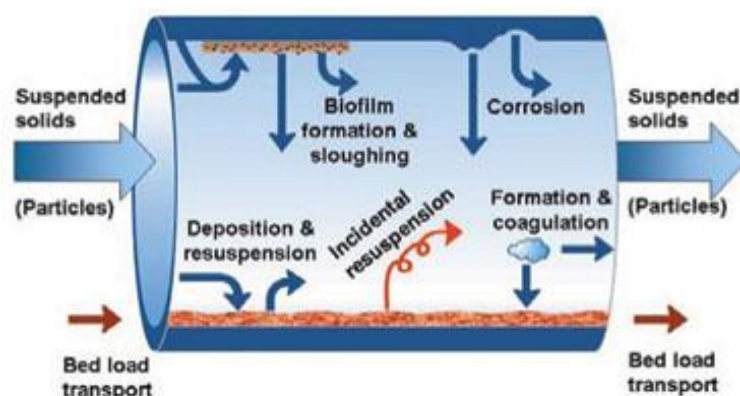


Figura 2-3 – Processos Físicos que provocam a formação de água turva (adaptado de (Vreeburg, 2009))

As partículas ressuspensas podem apresentar diferentes tamanhos e densidades e são provenientes de contaminações residuais do ponto de origem como a remoção incompleta de sólidos suspensos nas estações de tratamento de água (ex: areia), processos de corrosão e erosão nas tubagens, processos de formação de biofilmes e produtos de reações químicas.

O processo de formação dos depósitos nas tubagens é bastante complexo e ainda pouco compreendido. Este é influenciado por fatores como o tempo de contacto da água com a tubagem e as condições hidráulicas (caudal, declive). Em 2001, *Boxall*

demonstrou que a força gravítica não era suficiente para explicar a deposição de partículas de pequenas dimensões nas tubagens, principalmente quando estas estão sujeitas a regimes de escoamento turbulentos. Este autor e o seu colaborador Husband sugeriram que existe uma força de coesão entre as camadas de depósitos que é capaz de as manter junto à parede da tubagem mesmo quando a tensão de corte é elevada. O modelo que traduz matematicamente este princípio designa-se por PODDS (*Prediction Of Discolouration in a Drinking water System*) (Husband, et al., 2008).

3. Modelação e Simulação da Turvação em Sistemas de Distribuição

A utilização de modelos de simulação de distribuição de água é fundamental para o dimensionamento, simulação e operação das redes de distribuição de água. O termo “simulação” refere-se ao processo de utilização de uma representação matemática de um fenómeno real. As simulações de redes de distribuição de água são utilizadas quando o sistema real não pode ser alvo de testes no terreno ou, por exemplo, para avaliá-lo antes de ser construído.

Um dos fenómenos de interesse é o da turvação ou o da equivalência hidráulica que são traduzidos matematicamente. Para tal, recorre-se do cálculo computadorizado e de um *software* livre, o EPANET versão 2.0.

3.1. EPANET 2.0

O EPANET é um programa de modelação de sistemas de distribuição de água, desenvolvido pela agência de proteção ambiental dos E.U.A., EPA. Este *software* permite realizar simulações, num determinado período de tempo, do comportamento hidráulico e da qualidade da água em redes de distribuição pressurizadas. O programa pode ser descarregado a partir do *site* da EPA (<http://www.epa.gov/nrmrl/wswrd/dw/epanet.html#downloads>) e a versão atual é a 2.0, lançada em 1999 (Mays, 2000).

Este programa permite executar simulações estáticas e dinâmicas dos comportamentos hidráulicos e da qualidade da água, utilizando um interface gráfico baseado no mapa dessa rede. Uma rede é constituída por nós, reservatórios, tanques, tubagens, bombas e válvulas de controlo, sendo que os “nós” são onde pode existir um consumo de água, uma perda de carga significativa, uma introdução de uma espécie química e/ou uma alteração de cota significativa. Os reservatórios podem ser de nível fixo ou variável e representam entradas de água externa, como rios, lagos e/ou aquíferos subterrâneos.

O EPANET permite, ainda, obter ou estabelecer valores de caudal para cada tubagem, valores de pressão para cada nó, curvas características das bombas, curvas de nível-volume de água nos tanques e reservatórios, concentração de espécies químicas na rede durante o período de tempo da simulação e os coeficientes de decaimento ou formação (Rossman, 2000).

O EPANET pode ainda ser utilizado para:

- Estudar a propagação de constituintes não reativos, como os marcadores para simular episódios de contaminação;
- Determinar a percentagem de água proveniente de uma determinada fonte;
- Estimar a idade da água recebida em vários pontos da rede;
- Modelar o comportamento de uma determinada espécie química, que desaparece ou se forma com o tempo através de reações no seio e na parede das tubagens;
- Modelar formação de subprodutos de determinadas reações químicas ao longo do tempo.

Este programa pode ajudar a analisar estratégias alternativas de gestão nas entidades reguladoras das redes de distribuição de água. Deste modo, estas podem melhorar a qualidade da sua água, implementando, alguns dos seguintes exemplos:

- Alterações da origem da água, em sistemas munidos de vários pontos de origem;
- Alterações de esquemas de funcionamento de determinados equipamentos da rede de distribuição de água;
- Utilização de tratamentos adicionais para melhorar a qualidade da água;
- Seleção de quais as tubagens a sofrerem manutenção e substituição;
- Seleção das variáveis a ter em causa no caso de manutenção, como por exemplo o caudal.

O EPANET encontra-se dividido em dois módulos. O primeiro é o solucionador da rede que realiza simulações hidráulicas e de qualidade da água, e o segundo, é uma interface gráfica (GUI) que serve de entrada e saída para o solucionador e onde se encontra esquematizado a rede de distribuição. Normalmente, o utilizador deste programa utiliza os dois em conjunto para resolver o seu problema, mas pode utilizá-los independentemente (Mays, 2000).

3.2. Procedimento de utilização do EPANET 2.0

Segundo *Rossman* (Rossman, 2000), a modelação de sistemas de distribuição de água através de EPANET é constituída pelos seguintes passos:

- 1) Esquematizar o sistema de distribuição, representando todos os objetos que a constituem, ou importar um ficheiro de texto descritivo do sistema em estudo;
- 2) Editar as propriedades dos objetos que constituem a rede de distribuição de água;
- 3) Descrever as condições de operação;
- 4) Selecionar as variáveis a ter em conta nas opções da simulação;
- 5) Executar a simulação hidráulica ou de qualidade da água;
- 6) Visualizar os resultados dessa simulação;
- 7) Realizar uma calibração hidráulica ou de qualidade ao sistema em estudo.

3.3. Modelo EPANET/PODDS

Uma aplicação em EPANET pode ser constituída por dois modelos distintos, o modelo hidráulico e o modelo de simulação da qualidade da água. O modelo hidráulico é baseado no modelo de gradiente de *Todini e Pilati* e permite o cálculo da relação entre o caudal e a perda de carga. O gradiente hidráulico pode ser calculado pela fórmula de *Hazen-Williams* ou ainda *Darcy-Weisbach* e *Chezy-Manning* (Bento, 2012). O modelo de simulação da qualidade da água utiliza o método Lagrangeano, verificando os segmentos da rede de água e cada segmento pode conter diferentes reações entre espécies químicas, massas de depósito acumuladas, caudais, etc (Rossman, 2000).

As equações utilizadas nos modelos são baseadas em princípios de massa e em leis cinéticas de reação de espécies químicas, como por exemplo o transporte por advecção em tubagens, a mistura completa nos nós de ligação das tubagens, ou a mistura completa nos reservatórios de água. No caso do modelo de simulação da qualidade da água há dois mecanismos que funcionam em simultâneo para o decaimento de uma determinada espécie: o primeiro é o mecanismo que rege as reações da espécie química em estudo, no seio do líquido, segundo uma cinética que pode ser de 1ª ordem, 1ª ordem saturada, 2ª ordem ou de decaimento de *Michaelis-*

Menten. O outro mecanismo diz respeito às reações com biofilmes, subprodutos da corrosão e/ou o material constituinte das paredes das tubagens (Bento, 2012).

No modelo PODDS assume-se que o material é distribuído homogeneamente pelas paredes das tubagens em camadas de partículas coesas, para as quais é associada uma força, a força de coesão. A premissa básica deste modelo é que as camadas dão origem a um potencial de turvação que depende das condições hidráulicas diárias. Este modelo, conforme já foi referido, baseia o potencial de turvação na diferença entre as forças hidráulica e de coesão. Ou seja, quando a tensão de corte é superior à força de coesão ocorre mobilização do depósito e provoca turvação da água (Husband, et al., 2011).

A tensão de corte hidráulica pode ser calculada pela seguinte equação:

$$\tau = \rho g \frac{D}{4} S_0 \quad (3.1)$$

Onde:

- τ – Tensão de corte (N/m²);
- ρ – Massa volúmica (kg/m³);
- g – Constante de aceleração gravítica (m/s²);
- D – Diâmetro da tubagem (m);
- S_0 – Gradiente hidráulico (adimensional).

A força de coesão pode ser determinada pela seguinte fórmula que relaciona três parâmetros empíricos (C_{max} , k , e b), como podemos ver na Equação 3.2, e transpõe-se essa relação para figura, Figura 3-1.

$$\tau'_s = \frac{C^b - C_{max}}{k} \quad (3.2)$$

Onde:

- τ'_s – Força de coesão (N/m²);
- C – Potencial de turvação (NTUm);
- C_{max} – Potencial máximo de turvação (NTUm);
- k – Gradiente que descreve a relação entre a força de coesão e o potencial de turvação (NTUm³/N);
- b – Termo que permite a inclusão de modelos não lineares nesta relação.

Quanto maior é a força de coesão, menor é o potencial de turvação como se pode verificar na Figura 3-1. Logo, em secções de tubagem com tensões de corte mais altas, como cotovelos, T's, tubagens sem ponto de saída e tubagens com dimensões superiores ao necessário, o potencial de turvação é mais elevado.

O valor de k representa o quão rápido se pode mobilizar o material acumulado, e depende do diâmetro das tubagens. Logo quanto maior o diâmetro, maior será o valor absoluto do parâmetro k (Brown, 2012).

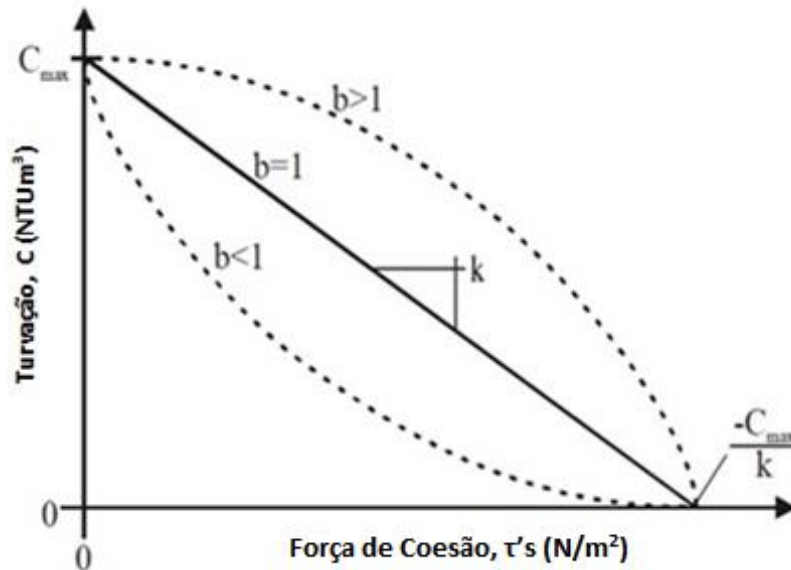


Figura 3-1 – Força de Coesão vs Turvação (Boxal, et al., 2005).

Para quantificar a mobilização das camadas de partículas, devido à tensão de corte aplicada, foi criada outra equação, a Equação 3.3, onde a taxa de ressuspensão do depósito, R (NTU m/s¹), é proporcional à diferença entre a tensão de corte aplicada, τ_a (N/m²), e a força de coesão das camadas, τ'_s (N/m²). O coeficiente de erosão P (NTU m³ /N.s) e o valor exponencial n permitem corrigir o aumento de R, linear ou não linearmente (Vreeburg, et al., 2007).

$$R = P(\tau_a - \tau'_s)^n \quad (3.3)$$

A mudança incremental da turvação, ΔN , resultante deste fenómeno de ressuspensão das camadas de partículas, pode ser calculada através da multiplicação da taxa de ressuspensão, R (NTUm/s), pela área superficial afetada, A_s (m²), e dividindo pelo caudal, Q (m³/s), como se pode verificar na Equação 3.4.

$$\Delta N = \frac{RA_s}{q} \quad (3.4)$$

A taxa de ressuspensão pode ainda ser calculada pela razão entre a variação do potencial de turvação ao longo do tempo, como na Equação 3.5.

$$\Delta C = R\Delta t \quad (3.5)$$

Os processos de regeneração do material ou acumulação foram, ainda, pouco investigados e quantificados. Porém este modelo permite o seu cálculo sem ter em conta a origem do material. A Equação 3.6 foi incluída no modelo, para prever a regeneração do material, ΔCr .

$$\Delta Cr = P' \Delta t T^L t_s'^m \quad (3.6)$$

Onde,

P' – Coeficiente de regeneração ($NTUm^3/NTt$);

T – Temperatura ($^{\circ}C$);

L, m – termos relacionado com as linearidades ou não da temperatura e força de coesão (adimensionais).

Este modelo foi codificado e compilado em *MSX-EPANET* por *Joby Boxall* em 2001 criando uma versão *turbidity beta EPANET 2.00.07 bTB2*. O *MSX – EPANET (Multi Species eXtension)* é uma extensão do EPANET que permite modelar esquemas de reações complexas entre múltiplos compostos químicos e/ou espécies biológicas, quer no seio do escoamento ou na parede das condutas. Esta extensão foi incorporada como um *toolkit* de funções que os programadores podem utilizar para construir aplicações personalizadas que podem adicionar ao EPANET, como foi o caso do modelo PODDS.

Esta extensão requer um novo ficheiro de dados MSX, onde o utilizador especifica as expressões matemáticas que determinam as reações associadas ao sistema em estudo, que podem ser de grande interesse para uma entidade gestora, consultores e/ou investigadores. Esta é distribuída de forma compacta, num ficheiro ZIP, que contém um programa em linha de comando, um compêndio de várias funções matemáticas e o manual de utilização. Todavia, este software ainda não foi integrado

numa interface Windows, mas prevê-se que venha acontecer futuramente (Rossman, 2000).

3.4. Dificuldades do Modelo PODDS

O modelo PODDS tem algumas dificuldades intrínsecas como a taxa de acumulação dos depósitos de partículas nas tubagens que devia obedecer a leis fundamentais. A taxa de regeneração dos depósitos é importante para se ter noção dos períodos de manutenção nas tubagens. Segundo *Boxall*, a expressão de regeneração de depósitos utilizada neste modelo é o inverso da expressão de mobilização, o que não é muito correto visto que ambas obedecem a diferentes leis fundamentais.

A tensão de corte instável durante a fase inicial é também um ponto fraco porque ela é importante na erosão das partículas e isso parece não estar refletido no modelo. O modelo também considera todo o comprimento das tubagens, independentemente das características topográficas ou dos seus acidentes hidráulicos. Ou seja, o valor de R pode ser superior ao esperado devido a existência de cotovelos a 90° e depressões na topografia das tubagens, que são um ótimo local para a deposição de partículas. (Neilands, et al., 2012)

3.5. Calibração do Modelo

A calibração é um processo que pretende ajustar o modelo ao acontecimento real, para que a simulação o preveja adequadamente. Esta aproximação à realidade depende sempre da calibração no modelo hidráulico como no de qualidade da água e das medições em campo que são fundamentais (Walski, et al., 2010).

No caso hidráulico, para além de um correto levantamento de medições de caudal ou velocidade, características das tubagens, altimetria, etc, pode-se simplificar a rede em estudo recorrendo à sua esqueletização (AWWA, 1999). O objetivo desta técnica consiste na diminuição do nº de nós, segmentos de tubagem, etc, mantendo equivalência hidráulica com a rede real (Bento, 2012).

Na calibração de modelos de qualidade de água devemos ter a noção de dois aspetos. O primeiro é a localização dos focos de contaminação nas redes de distribuição de água e o segundo é a escolha das condições iniciais. O comportamento desses focos de contaminação pode ser introduzido no modelo, como uma entrada constante ou a variar ao longo do tempo, sendo que é necessário obter os seus valores no terreno. A escolha das condições iniciais, como por exemplo os valores de caudal, temperatura, influencia obviamente os resultados finais.

Um dos problemas na calibração dos modelos das redes de distribuição é o coeficiente de rugosidade que varia de tubagem para tubagem. Este valor, não pode ser medido diretamente e não se encontram valores exatos em bibliografia, mas pode ser deduzido por medições no terreno através de um ajuste aquando da calibração (Walski, et al., 2010). Outro problema são os fenómenos de corrosão e/ou erosão que alteram a superfície interna das tubagens diminuindo o seu diâmetro. Por este motivo, deve-se utilizar o diâmetro nominal e ajustar os valores de rugosidade (AWWA, 1999).

3.6. Desenvolvimentos Recentes sobre modelação de formação e ressuspensão de depósitos em tubagem

A realização de simulações ou modelações no funcionamento de sistemas hidráulicos tem conhecido na última década avanços significativos, em particular, o estudo da acumulação de depósitos nas redes de distribuição de água potável. Estes são bastante importantes, porque foram desenvolvidos e aperfeiçoados com base em dados recolhidos de situações reais, sempre a par do desenvolvimento da linguagem de programação.

Em 2001, *Ackers et al.* ponderaram a aplicação de equações de modelos de transporte de partículas e modelos de sedimentação existentes para rios, que foram provenientes de uma pesquisa anterior sobre transporte de lama, para redes de distribuição de água. Porém, esta fórmula não era apropriada para as redes de distribuição de água porque só considerava tamanhos de partícula elevados (superiores a 60 mm) e porque a concentração de partículas era demasiado elevada (*Ackers, et al., 2001*). Posteriormente foram lançados dois novos modelos nesta área: (1) o PODDS proposto por *Boxall* em 2001; (2) O modelo de sedimentação de partículas por *Wu* em 2003.

O modelo de sedimentação de partículas de *Wu*, de 2003, prevê a regeneração dos depósitos de partículas baseando-se numa taxa de deposição média de partículas e num caudal médio necessários para a ressuspensão. Este modelo foi desenvolvido na Austrália e é baseado em forças gravíticas para a deposição de partículas e nas forças de coesão para a ressuspensão. As taxas de ressuspensão são obtidas por medições em modelo piloto de laboratório e o modelo encontrava-se em validação em 2003. Este modelo apresenta algumas limitações, tais como os resultados das taxas provirem de ensaios laboratoriais conduzidos em tubos de PVC com 100 mm de diâmetro e tubos de ferro fundido, o que influencia a aproximação à realidade. (*Wu, et al., 2003*)

O modelo PODDS conforme referido no Capítulo 2, prevê o aparecimento de água turva nas redes de distribuição de água devido à sobreposição de forças de tensão de corte sobre as de coesão em depósitos existentes nas paredes das tubagens. Este modelo foi validado na rede de distribuição do Reino Unido em 2005, por *Boxall e Saul*.

Em 2006, um trabalho conjunto de *Vreeburg e Boxall* apresenta uma revisão ao modelo PODDS. Explicam de uma forma explícita a deposição coesa de partículas em camadas nas paredes das tubagens e usam o método de ressuspensão para medir o risco de mobilização dos depósitos nas tubagens, aumentando a velocidade de escoamento base da água até 0,35 m/s. Constataram que este método pode ser utilizado para efeitos de gestão de manutenção, ou seja, avaliação da necessidade de limpeza da conduta.

Em 2008, *Vreeburg* publica um artigo sobre qualidade de água na rede de distribuição de água da Holanda, onde identifica que o tempo de regeneração de depósitos em certas zonas do país foi de 1,5 anos. Apresenta, também, uma média do tamanho de partículas que se depositam nas redes de distribuição de água, 2-31 μm , através do método de concentração do volume de partículas (PaVoC). Este método consiste em ter vários contadores de partículas ao longo da rede de distribuição.

No mesmo ano de 2008, *Husband e Boxall* pesquisaram as possíveis fontes dos depósitos de partículas e verificaram que no Reino Unido, o evento da turvação e cor pode ser causado devido a erosão e corrosão das tubagens de ferro fundido, que lá predominam. Determinaram que os principais constituintes das partículas eram metais: ferro e manganês. Aplicaram esse facto em laboratório e verificaram que o processo corrosivo e de deposição começavam a ser notórios a partir da primeira semana de utilização do modelo piloto (turvação média de 0,15 NTU e concentração média de

ferro de 0,03 mg/L). Em 2010, os mesmos autores aplicaram o modelo PODDS no terreno, já com as devidas alterações. Obtiveram uma tensão de corte de $1,2 \text{ N/m}^2$, a partir da qual começou a haver mobilização dos depósitos. Concluíram que o tipo de material que constitui as tubagens condiciona a formação dos seus depósitos e formularam novas estratégias de manutenção para a rede de distribuição de água inglesa.

Em 2012, *I. Douterelo, R.L. Sharpe e J.B. Boxall* publicaram um artigo sobre a influência dos biofilmes na formação de água turva onde verificaram que estes são bastantes difíceis de remover durante as operações de manutenção. Mais tarde os biofilmes formam outros, ainda mais compactos, o que se torna um problema.

No mesmo ano, na Letónia, foi publicado um estudo de *Neilands* sobre a influência de acidentes no percurso hidráulico (cotovelos, Ts, etc.) na acumulação de depósitos das redes de distribuição de água potável. Este fator não está diretamente descrito no modelo PODDS, mas constitui uma fonte de deposição de partículas nas redes de distribuição de água.

Atualmente, *Boxall e Husband* têm vindo a estudar o problema da regeneração. Estes autores propõem um novo modelo que apresenta a quantidade de material que se encontra depositado na parede da tubagem ao longo do tempo e para cada tensão de corte. Esta formulação foi codificada em EPANET (Furnass, et al., 2013).

3.7. Método RPM – Método Potencial de Ressuspensão

O método RPM (*Resuspension Potencial Method*) foi desenvolvido em 2004 na Holanda por *J.H.G. Vreeburg* e pretende ser um método que avalia os riscos da mobilização ou ressuspensão dos depósitos acumulados nas tubagens.

O procedimento consiste num aumento controlado até 0,35 m/s na velocidade de escoamento. Este valor provoca um aumento da tensão de corte e eventualmente mobilização que terá que ser medida por ensaios de turvação. O valor do caudal multiplicado pelos valores de turvação obtidos no ensaio em determinado período de tempo dá origem a um valor que reflete o grau de risco de turvação.

Este método é aplicado da seguinte forma:

- Isola-se a tubagem onde se pretende estudar o risco de turvação (A secção isolada deve ter no mínimo 315 m de distância, para garantir que a tubagem seja afetada);
- Abrir um hidrante para causar o aumento adicional até 0,35 m/s na velocidade, durante 15 min, e voltar ao normal;
- Monitorizar a turvação durante 15 min e prolongar até voltar ao seu valor inicial.

O método RPM tem vindo a ser utilizado pelas empresas de distribuição de água holandesas há quase uma década e permite avaliar a necessidade e a frequência de realizar limpeza em tubagens (Vreeburg, et al., 2007).

O resultado da monitorização é apresentado na Figura 5-9 onde é possível distinguir 4 etapas:

- 1 – Base: precede a perturbação hidráulica;
- 2 – Perturbação I: os primeiros 5 minutos do aumento de velocidade dão origem a uma mobilização instantânea que resulta num pico de turvação;
- 3 - Perturbação II: os 10 minutos finais do aumento de velocidade que dão origem a um decréscimo da perturbação;
- 4 – Retorno à Base: Este tempo de retorno é importante pois permite avaliar o risco, ou seja, quanto maior for este tempo maior é esse risco de mobilização.

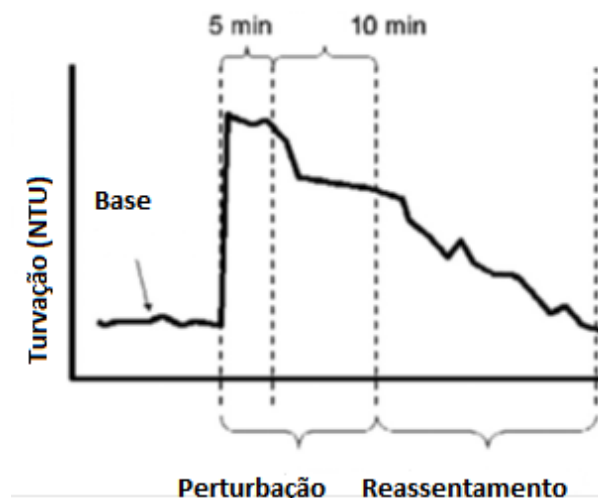


Figura 3-2 – Evolução temporal da turvação após mudança de velocidade na tubagem

Para determinar o risco de ressuspensão tem de se ter em consideração 5 fatores: a turvação máxima e média nos primeiros 5 e nos restantes 10 minutos da perturbação hidráulica e o tempo de retorno. Cada um destes fatores é avaliado de 0 a 3, e no final tem-se uma pontuação de 0 a 15.

O valor do risco serve para ser utilizado em operações de manutenção, para avaliar a necessidade de realização de limpeza nas tubagens, assim como para determinar a eficiência após limpeza, permitindo criar rotinas de manutenção. (Vreeburg, et al., 2007)

4. Metodologia Aplicada

4.1. Dados disponíveis

No início do trabalho este projeto já contava com a modelação hidráulica em EPANET de quatro grupos de adutoras do sistema de distribuição de água em alta da AdDP: 2 com esqueletização e 2 sem esqueletização.

Numa fase inicial do trabalho seleccionou-se o ramal **Ramalde-Cabanas-Pedrouços**, que se encontra representado na Figura 4-1, a **vermelho**, um dos grupos de adutoras com esqueletização, para a realização das modelações hidráulica e turvação.



Figura 4-1 – Subsistema Lever Norte que contém o grupo de adutoras Ramalde - Cabanas – Pedrouços.

Este ramal contém duas adutoras, uma inicial em betão com um diâmetro nominal de 1250 mm, seguida da conduta principal em ferro fundido dúctil com um diâmetro nominal de 1200 mm e com um comprimento de 10000 m. O ramal transporta a água por ação gravítica sem recurso a bombas, e é bastante complexo, devido à quantidade

elevada de nós que contém. No entanto, após realização dos ensaios em campo, optou-se por estudar o ramal **Jovim–Ramalde** (a verde, na Figura 4-1), sem esqueletização, porque continha uma picagem entre Jovim e o reservatório de Ramalde e sobretudo porque a capacidade de armazenamento no reservatório de Ramalde ($10000+10000\text{ m}^3$) permitia a disponibilização de uma das células do reservatório, de forma a realizar ensaios de acréscimo de caudal, sem comprometer a qualidade/quantidade de água a fornecer aos Municípios.

Este ramal tem um comprimento total de 5149 m e encontra-se dividido em duas condutas distintas. A primeira, de betão, com um diâmetro nominal de 1250 mm, e a segunda, de ferro fundido dúctil, com um diâmetro nominal de 1400 mm e com um comprimento de 2574 m.

O registo dos valores de turvação foi realizado na condução de ferro fundido dúctil, em dois pontos distintos, o primeiro a 1400 m de Jovim e o segundo à chegada do reservatório de Ramalde.

O modelo hidráulico neste ramal foi bastante simplificado de acordo com as opiniões do Dr. *Stewart Husband* e *Joby Boxall* e introduzido na versão *turbidity beta 2.00.07 bTB2* do EPANET que os autores forneceram.

Em funcionamento regular, o ramal (constituído pelas duas condutas supra mencionadas) está sujeito a 2 bombas em simultâneo debitando cada uma cerca de $3000\text{ m}^3/\text{h}$. As estações elevatórias a montante dispõem ainda de mais 2 grupos de bombagem para os quais se pretenderia conhecer o impacto do acréscimo de velocidade na condução, nomeadamente em termos de turvação da água, um dos objetivos definidos para este trabalho.

4.2. Ensaios para calibração do modelo PODDS

Para se conhecer os parâmetros do modelo foi necessário variar o caudal e recolher os valores da turvação e os caudais ao longo do tempo. Logo, foram realizadas duas campanhas no terreno, a primeira no dia 27-05-2013 e a segunda no dia 03-06-2013.

Na 1ª campanha as medições de turvação foram realizadas a cerca de 1400 m de distância do Reservatório e Elevatória de Jovim. Enquanto na segunda campanha

foram registados os valores não só nesse ponto, mas também no final da adutora à entrada do Reservatório de Ramalde.

Em ambas as campanhas foram recolhidos os valores de turvação com o turbidímetro portátil *Hach 2100 Qis* (em Ramalde) e o turbidímetro *Online MicroTol*, munido de um *Data Logger Monarch Data Chart* (a 1400 m de Jovim), ambos visíveis nas Figuras 4-2, 4-3 e 4-4.



Figura 4-2 – Turbidímetro Portátil Hach 2100 Qis.



Figura 4-3 – Turbidímetro Online *MicroTol*.



Figura 4-4 – Data Logger Monarch Data Chart

Para a realização da medição a 1400 m de Jovim foi necessário usar uma “picagem”, como podemos ver na Figura 4-5, que é nada mais do que um pequeno furo na tubagem ao qual se associa uma pequena válvula de fecho. A essa válvula ligou-se uma mangueira com cerca de 10 m, que por sua vez ligava ao turbidímetro *online*. Garantiu-se, com uma válvula, a passagem de caudal constante na célula de medição do equipamento, fazendo um registo constante da turvação ao longo do tempo.

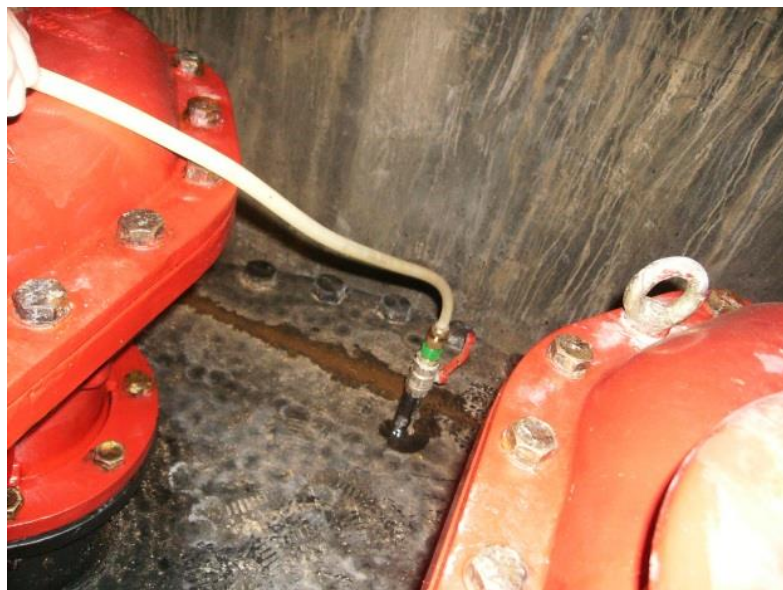


Figura 4-5 – Imagem Representativa de uma “picagem”.

4.3. Obtenção dos Parâmetros de Modelo

➤ Metodologia de Cálculo em Excel

A recolha dos valores da turvação e dos caudais ao longo do tempo nos ensaios de campo, permitiram realizar a calibração do modelo. Criou-se uma folha de cálculo em Excel e de acordo com o modelo PODDS determinaram-se as forças de coesão e tensão de corte, assim como a taxa de ressuspensão R.

Para a realização da folha de cálculo em Excel (ver Anexo A), seguiu-se o seguinte algoritmo de iteração:

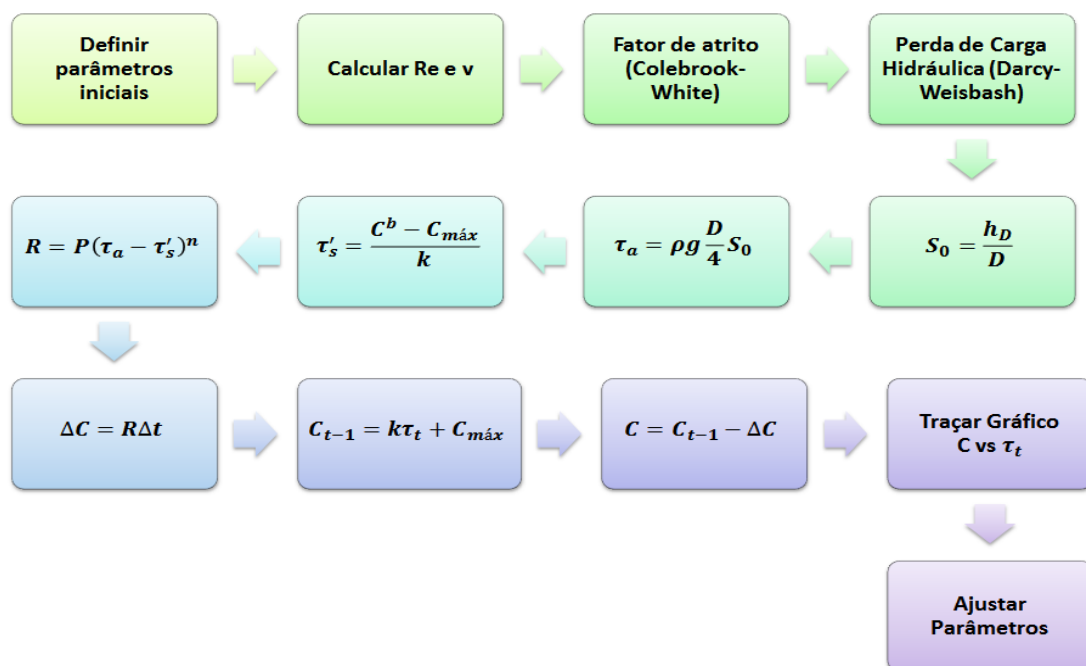


Figura 4-6 – Diagrama da Metodologia de Calibração do Modelo em Excel.

Numa fase inicial realizou-se um acerto aos valores da turvação e do caudal, para que estes estivessem coerentes com as unidades exigidas pelas equações e definiram-se valores iniciais expostos na Tabela 4-1.

Tabela 4-1 – Parâmetros propostos pelo Dr. Joby Boxall (Boxall, et al., 2009)

Parâmetro	Valor
C _{máx}	100
b	1
k	-3
P	0,005
N	1

De seguida calculou-se o número de *Reynolds* e da velocidade pelas seguintes equações:

$$Re = \frac{\rho \times v \times D}{\mu} \quad (4.1)$$

$$v = \frac{Q}{At} \quad (4.2)$$

Onde:

ρ – Massa volúmica da água;

v – Velocidade (m/s);

D – Diâmetro nominal (m);

μ - Viscosidade dinâmica da água;

Q – Caudal (m³/s);

At – Área transversal da tubagem (m²).

Para o cálculo da perda de carga hidráulica, optou-se por utilizar a equação de *Darcy-Weisbach* porque a equação de *Chezy-Manning* só é utilizada em canal aberto, e a equação *Hazen-Williams* é utilizada apenas para água e regimes de escoamento turbulentos. A Equação de *Darcy-Weisbach* está representada a seguir na Equação 4.3.

$$h_D = f \times \frac{L}{D} \times \frac{v^2}{2g} \quad (4.3)$$

Onde:

h_D - perda de carga ao longo do comprimento do tubo (m.c.a);

f - fator de atrito (adimensional);

L - comprimento do tubo (m);

v - velocidade do líquido no interior do tubo (m/s);

D - diâmetro interno do tubo (m);

g - aceleração da gravidade local (m/s²).

Para obter o fator de atrito utilizou-se a equação de *Colebrook-White*:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left(\frac{K}{3,7D} + \frac{2,51}{Re \sqrt{f}} \right) \quad (4.4)$$

Onde:

K - rugosidade equivalente da parede do tubo (m);

Re - número de *Reynolds* (adimensional);

f – Fator de Atrito (adimensional).

Relativamente ao valor *k*, da rugosidade equivalente da parede do tubo, recorreu-se à literatura e para uma tubagem de ferro fundido o valor ronda 0,0008 – 0,0015 m. Decidiu-se escolher um valor intermédio de 0,001 m para a realização deste cálculo.

O cálculo do gradiente hidráulico, que entra diretamente no cálculo da tensão de corte é determinado pela Equação 4.5.

$$S_0 = \frac{h_D}{L} \quad (4.5)$$

Onde:

h_D - perda de carga ao longo do comprimento do tubo (m.c.a);

S₀ - Gradiente hidráulico (adimensional);

L - comprimento do tubo (m).

Os valores deste gradiente foram utilizados no cálculo da tensão de corte pela Equação 3.1. Tendo em conta que, a força de coesão foi determinada pela Equação 3.2, atribuindo valores aos parâmetros **b**, **k** e **C_{máx}**, e tendo em conta que só há ressuspensão dos depósitos na tubagem se o valor desta força for inferior à tensão de corte. Seguidamente calculou-se o valor da taxa de ressuspensão, **R**, que relaciona a ressuspensão com a tensão de corte. Na equação 3.3 estão incluídos outros 2 parâmetros do modelo, **P** e **n**.

Por fim, foi possível quantificar a variação da turvação, ΔC , através da Equação 3.5, representada no Subcapítulo 3.3 e calculado o potencial de turvação em cada instante, **C_{t-1}**, através da Equação 4.6.

$$C_{t-1} = k \times \tau_t + C_{máx} \quad (4.6)$$

Onde:

C_{t-1} – Potencial de turvação em cada instante (NTUm);

k - Gradiente que descreve a relação entre a força de coesão e potencial de turvação da água (NTUm³/N);

τ_t – Força de Coesão (N/m^2);

$C_{m\acute{a}x}$ – Potencial máxima de turvação (NTUm).

A este valor de potencial subtraiu-se o valor da variação do potencial de turvação e obteve-se o valor real de turvação em cada instante de tempo, conforme se pode verificar na Equação 4.7.

$$C = C_{t-1} - \Delta C \quad (4.7)$$

Onde:

C – Turvação em cada instante de tempo (NTUm);

C_{t-1} – Potencial de turvação em cada instante (NTUm);

ΔC – Incremento na turvação (NTUm).

Numa instância final traça-se o perfil C vs τ_t , como podemos ver no exemplo da Figura 4-7. É através desta figura que se realiza o ajuste dos parâmetros do modelo. A iteração é atribuir valores aos parâmetros do modelo até que o valor da ordenada na origem seja igual ao parâmetro $C_{m\acute{a}x}$ e o valor do declive seja igual ao do parâmetro k . Nessa altura, e tendo em conta o coeficiente de determinação reafirma-se que o modelo se encontra devidamente calibrado.

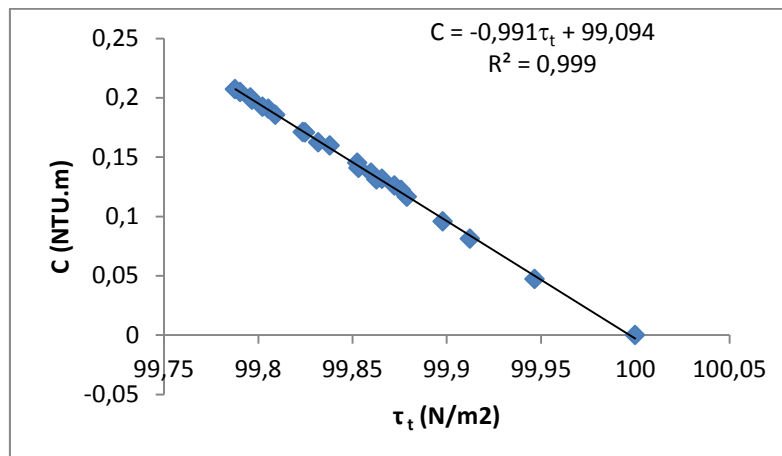


Figura 4-7 – Imagem Representativa do Gráfico C versus τ_t , para os parâmetros $C_{m\acute{a}x} = 100$ e $k = -1$.

Também se calcula pela Equação 3.4 o incremento na turvação, ΔN , causado pela ressuspensão do depósito.

Ainda pela folha de cálculo, numa fase prévia à metodologia anterior, foi possível determinar o valor dos parâmetros pelo seguinte procedimento:

- **1º Passo** - Fixar os valores iniciais dos parâmetros (C_{\max} , k , P , n , b), utilizando os valores propostos pelo Dr. *Joby Boxall*;
- **2º Passo** – Realizar todos os cálculos (*Reynolds*, Velocidade, Equação de *Colebrook-White*, *Darcy-Weisbach*, Gradiente Hidráulico);
- **3º Passo** – Determinar os valores da tensão de corte hidráulica, τ_a , pela equação 3-1 do modelo;
- **4º Passo** – Calcular os valores de ΔN , incremento da turvação pela equação 3-4;
- **5º Passo** – Calcular a taxa de Fornecimento, R , pela equação 3-3;
- **6º Passo** – Calcular as Forças de Coesão, τ 's, pela equação 3-2;
- **7º Passo** – Traçar o gráfico C vs τ 's e determinar os parâmetros.

Comparando com o algoritmo anterior, este envolve menos cálculos e difere a partir do 4º passo.

➤ **Metodologia de cálculo em EPANET 2.00.07 bTB2**

O EPANET versão 2.00.07 bTB2 fornecida pelo Dr. *Stewart Husband* da Universidade de *Sheffield* seguiu o seguinte algoritmo de cálculo da Figura 4-8.

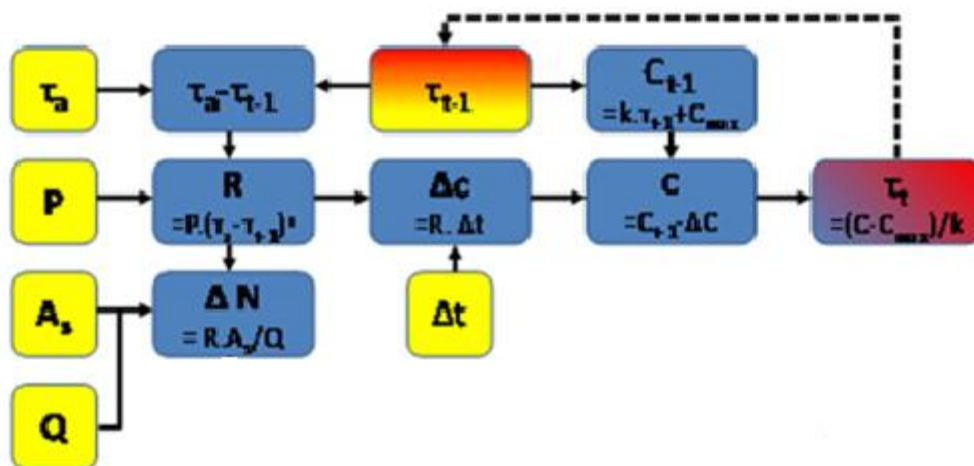


Figura 4-8 – Diagrama da Metodologia de Calibração do Modelo proposto por Dr. *Stewart Husband*.

A utilização do EPANET para efeito de calibração é o método mais simples, conforme foi indicado pelo Dr. *Stewart Husband*, da Universidade de *Sheffield*.

Para a realização do ensaio de calibração no EPANET é necessário efetuar alguns passos prévios. Inicialmente deve-se desenhar a adutora Jovim – Ramalde na interface gráfica. O seu desenho é bastante simples, visto que foram considerados apenas 2 nós: o da picagem (a 1400 m) e o do reservatório de Ramalde e o reservatório de Jovim, como se pode observar na Figura 4-9.



Figura 4-9 – Adutora Jovim – Ramalde desenhada em EPANET.

Após o desenho da adutora introduziram-se as características hidráulicas conhecidas nos segmentos e nós. Pode-se executar essa função de duas formas ou pelas janelas descritivas diretamente no EPANET ou pelo ficheiro .INP, exemplo em anexo C, que é um ficheiro que pode ser aberto em *Wordpad* e contém a informação introduzida pelo utilizador para um determinado ramal (comprimento e diâmetro da tubagem, temperatura da água, parâmetros iniciais do modelo PODDS, tipo de equação utilizada para as perdas de carga, entre outros).

Numa fase final foram criados 2 ficheiros de texto com os resultados de turvação ao longo do tempo nos dois pontos de recolha e, posteriormente, foram introduzidos por *upload* na versão 2.07 do *EPANET* (*Project > Calibration Data > Quality > Procurar Ficheiro > ok*).

Outro dado necessário a introduzir no *software* é o caudal ou os caudais que foram introduzidos considerando um padrão de consumo a que se designou de *pattern*. Esta variação de caudal ao longo do tempo resulta de um caudal base de 1020 L/s e de um padrão de consumo, de 2 em 2 minutos, conforme se pode observar na Figura 4-10. Considerou-se este intervalo de tempo porque o *EPANET* funciona em

time steps, ou seja, variações de tempo. Em seguida, incorporou-se esse *Pattern* e o caudal base em *Browser > Data > Patterns*.

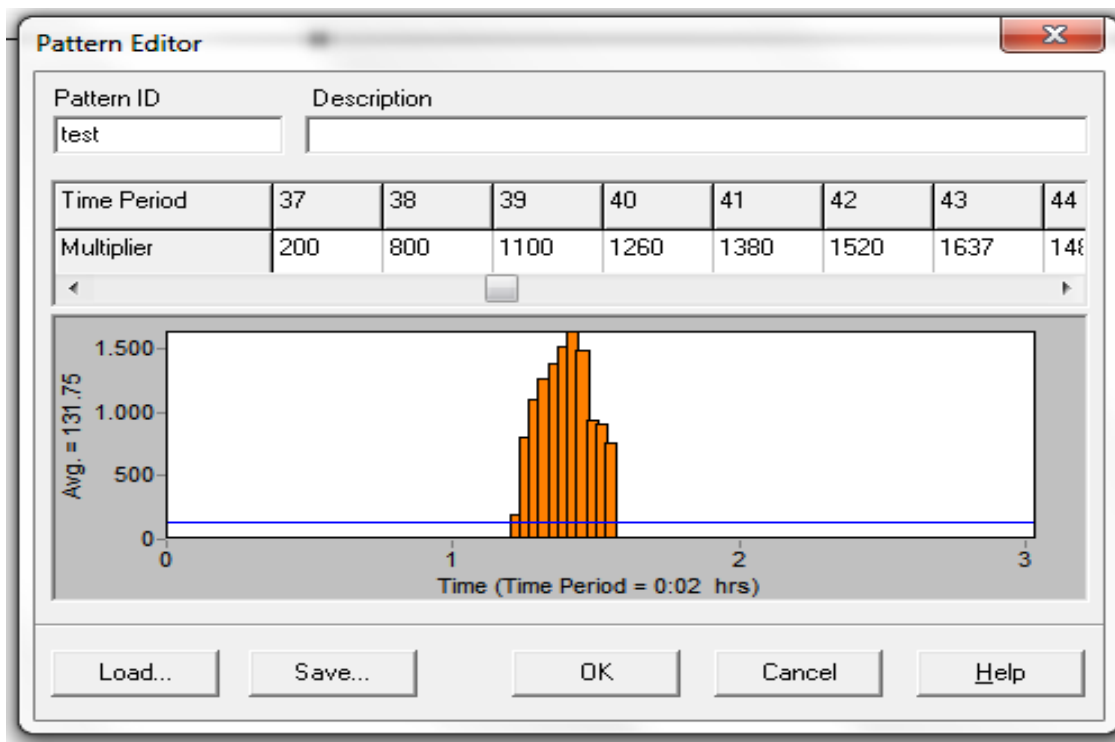


Figura 4-10 – *Pattern* de caudal utilizado em EPANET 2.00.07 bTB2.

O ajuste dos parâmetros do modelo é automático e os resultados obtidos na simulação podem ser comparados com os dos ficheiros. No final de cada simulação, aparece uma janela que pergunta se queremos atualizar a força de coesão com os valores calculados nesta simulação, e aí devemos dizer que sim para que o modelo ajuste os valores obtidos até serem coerentes com os valores da realidade contidos no ficheiro de calibração.

O resultado das forças de coesão são automaticamente introduzidos no ficheiro .INP. Após algumas simulações seguidas, os valores obtidos na simulação podem ser visualizados acedendo *Report>Graph>Selecionar Parâmetro "Turvação">ok*, que mostra ambos os valores reais e os simulados, conforme se pode ver na Figura 4-11. (a **vermelho** estão os valores obtidos pela simulação e a verde os valores recolhidos no terreno).

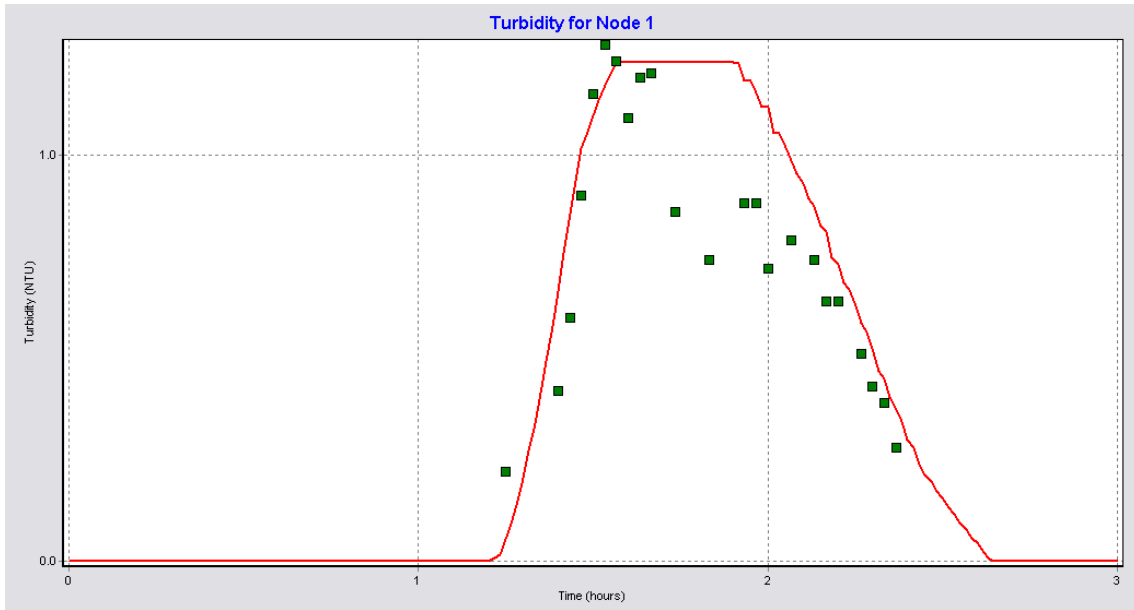


Figura 4-11 – Exemplo do gráfico de uma boa calibração, com os valores obtidos na simulação (a vermelho) e valores registados em campo (a verde).

5. Discussão de Resultados

5.1. Parâmetros obtidos no modelo PODDS

No dia 27-05-2013 foi realizada a primeira campanha de registo da turvação ao longo do tempo, em que se utilizaram duas bombas (com arranque faseado). A tubagem encontrava-se sem qualquer consumo desde as 9h30 da manhã para permitir alguma deposição de possíveis partículas que se encontrassem no seio do líquido. A primeira bomba arrancou às 12h20 com um caudal de 3890 m³/h e, curiosamente, não se verificou qualquer variação da turvação, ou seja, o valor da turvação não saiu de 0,11 NTU. Passados 20 minutos, arrancou a 2ª bomba, ficando a trabalhar em simultâneo com a 1ª bomba, e obteve-se um caudal de 7040 m³/h, no entanto nenhuma variação do valor de turvação foi registada, mantendo-se o valor nos 0,11 NTU.

A velocidade de escoamento com ambas as bombas em funcionamento não foi suficiente para se ter uma tensão de corte superior à força de coesão dos depósitos e, por isso, não houve ressuspensão ou calibração do modelo. Por esse motivo, para efeitos de ensaio para o trabalho em questão, foi ponderada a colocação de uma terceira bomba em funcionamento. Após a tomada das medidas necessárias para prevenir repercussões na qualidade da água na rede de distribuição, foi então realizado um ensaio com 3 bombas em funcionamento simultâneo, o que aconteceu na segunda campanha no dia 03-06-2013. O ensaio arrancou às 15h19 e atingiu um caudal de 9500 m³/h durante 15-20 minutos. Neste salto quantitativo a 1ª bomba esteve a funcionar durante a manhã, seguindo-se a 2ª bomba para que a variação hidráulica fosse suave.

Nesta segunda campanha os valores de turvação foram registados em dois pontos distintos, como já referido anteriormente, o que permitiu que houvesse uma comparação de valores obtidos. Com as 3 bombas em simultâneo já foi possível medir uma variação de turvação conforme se pode observar na Figura 5-1. Houve um aumento inicial no caudal (cor verde) devido à entrada em funcionamento da terceira bomba o que provocou aumento na turvação. Após este pico, desligou-se a terceira bomba e esperou-se que os valores de turvação descessem para valores próximos da turvação inicial (~0,1 NTU).

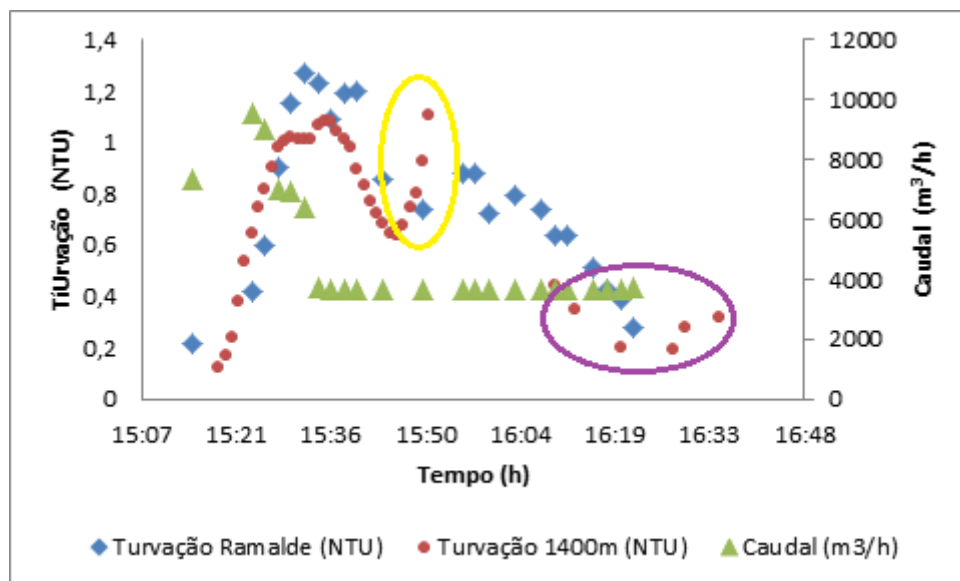


Figura 5-1 – Evolução dos valores de turvação e caudal registados nos dois pontos de recolha durante o ensaio de campo.

O ensaio teve a duração de cerca de 1 hora e os valores de turvação nos dois pontos de observação formaram um pico inicial semelhante, embora com alguma diferença devido a haver uma distância entre as medições. A 1400 m (cor **vermelha**), após aproximadamente 30 minutos houve um corte na energia do gerador que alimentava o turbidímetro *online* o que provocou flutuações nos valores da turvação (círculo **amarelo**). Mais tarde utilizou-se o turbidímetro portátil para registar os cinco últimos pontos (círculo **roxo**) que também são incertos. Estes dois conjuntos de valores não foram considerados na calibração.

➤ **Metodologia em folha de cálculo**

Com os valores de turvação e caudal registados no ensaio em campo realizou-se a calibração do modelo PODDS conforme descrito anteriormente, no subcapítulo 4.3, e como podemos voltar a rever, os cálculos efetuados, no anexo B.

Após os cálculos necessários obtiveram-se os seguintes perfis de C (NTU m^3) vs τ'_s para as 2 estações de amostragem (Figura 5-2 e 5-3):

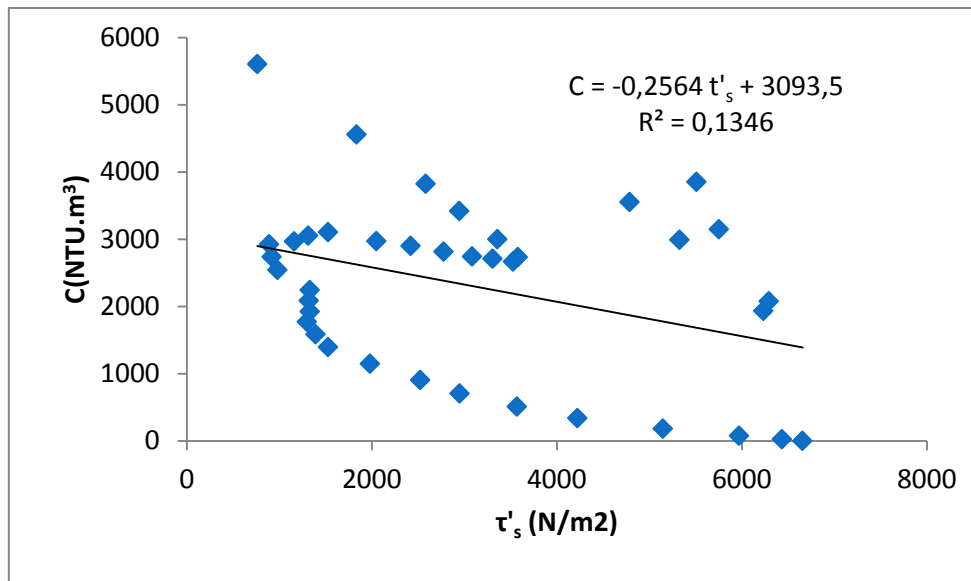


Figura 5-2 – Evolução C (NTUm³) vs τ'_a , dos dados recolhidos a 1400m.

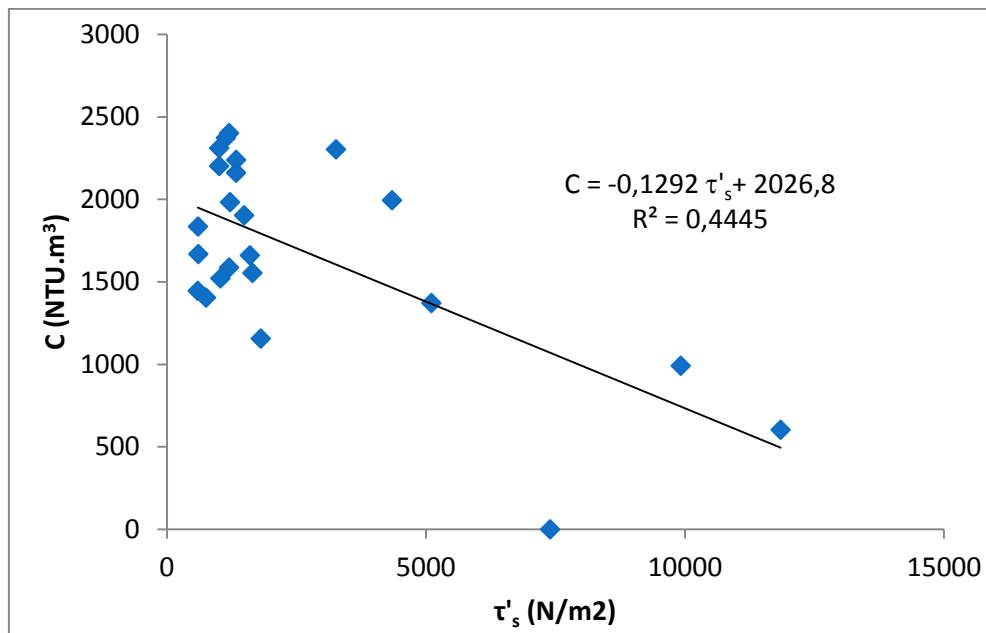


Figura 5-3 – Evolução C (NTUm³) vs τ'_a , dos valores recolhidos em Ramalde.

Os ajustes apresentados nas figuras anteriores foram conseguidos por alteração dos parâmetros do modelo até que a ordenada na origem fosse igual ao $C_{\text{máx}}$ (NTU.m³), que na estação a 1400 m de Jovim foi de 3103 NTU.m³ e em Ramalde de 2402 NTU.m³. Todavia, estas duas figuras não apresentaram um coeficiente de determinação aceitável, e colocou-se em causa esta metodologia de cálculo.

Os valores dos parâmetros associados a este rearranjo são os apresentados na Tabela 5-1.

Tabela 5-1 – Parâmetros do modelo PODDS obtidos em folha de cálculo.

Parâmetro	1400m	Ramalde
C _{máx}	100	100
b	1	1
k	-0.2564	-0.1292
P	7.1E-8	7.0E-8
n	1	1

Durante o ajuste verificou-se que o modelo é muito dependente dos parâmetros k e P e que o valor de P é bastante baixo. Admitiu-se que este valor de P pode estar relacionado com as características da tubagem. O valor de k, foi negativo conforme esperado e encontra-se ligeiramente alto, o que poderá estar relacionado com o diâmetro elevado da tubagem.

Estes resultados levantaram alguma suspeita do algoritmo utilizado e optou-se por determinar os valores de incremento da turvação após o cálculo das taxas de ressuspensão e das forças de coesão. Os resultados dos perfis C (NTUm³) vs τ'_a são apresentados nas Figuras 5-4 e 5-5.

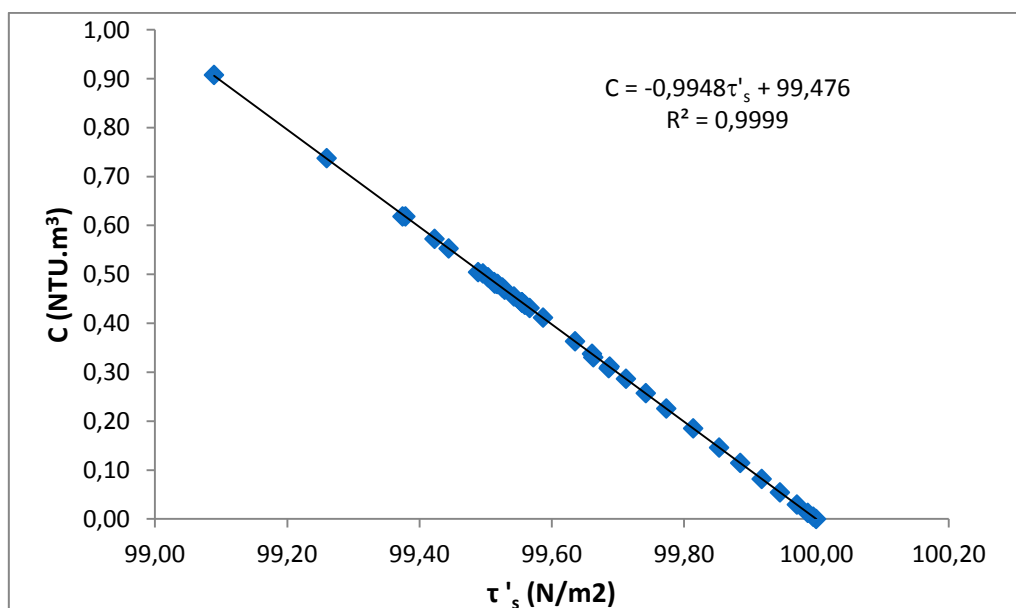


Figura 5-4 – Evolução C (NTUm³) vs τ'_a dos valores recolhidos a 1400 m.

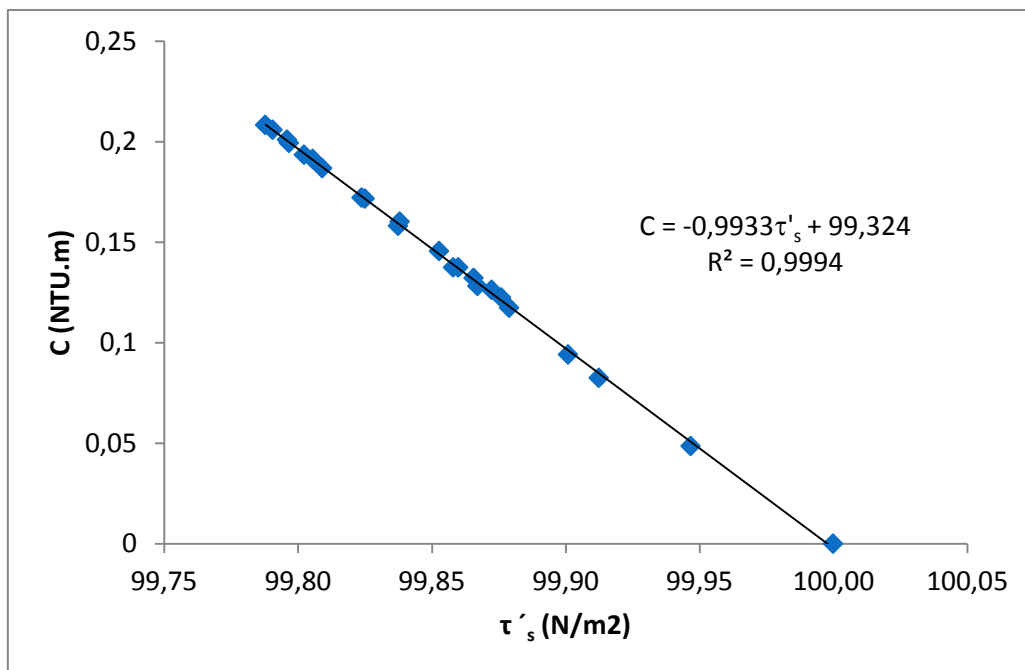


Figura 5-5 – Evolução C (NTUm³) vs τ'_a dos valores recolhidos em Ramalde.

Para o ajuste e obtenção dos parâmetros do modelo variaram-se os valores iniciais, até que o valor da ordenada na origem fosse igual a $C_{m\acute{a}x}$ e o valor do declive igual a k , tendo sempre em conta o melhor coeficiente de determinação. Os valores dos parâmetros encontram-se representados na Tabela 5-2.

Tabela 5-2 – Parâmetros obtidos pela metodologia de Cálculo Criada.

Parâmetro	1400m	Ramalde
$C_{m\acute{a}x}$	100	100
b	1	1
k	-1	-1
P	2.4E-10	7.0E-8
n	1	1

Os coeficientes de determinação nas duas figuras anteriores foram muito bons e melhores do que com o algoritmo anterior. No entanto verificou-se também que o modelo depende bastante dos parâmetros k e P . Para além disso continua-se a verificar um valor de P baixo. A utilização do MSX, onde se incorporaria as formas de cálculo utilizadas anteriormente e/ou recorrendo a uma análise de sensibilidade sobre os parâmetros k e P , poderia ajudar a compreender estas variações nos parâmetros.

Todavia, após consultar o Dr. *Stewart Husband*, este indicou-nos que o método mais simples e menos trabalhoso era a utilização do EPANET 2.00.07 bTB2 para obter os valores dos parâmetros.

➤ **Metodologia de cálculo em EPANET 2.00.07 bTB2**

Após desenho da rede em estudo em EPANET 2.00.07 e o *upload* dos dados da evolução temporal da turvação, obtidos no ensaio de campo para calibração do modelo PODDS, realizaram-se os perfis C (NTUm³) vs τ'_a representados nas Figuras 5-4 e 5-5, para as duas estações de monitorização.

Para a estação de monitorização a 1400 m de Jovim realizaram-se as devidas simulações até se fazer o ajuste dos dados experimentais com os reais introduzidos em ficheiro de calibração. O resultado final é apresentado na Figura 5-6.

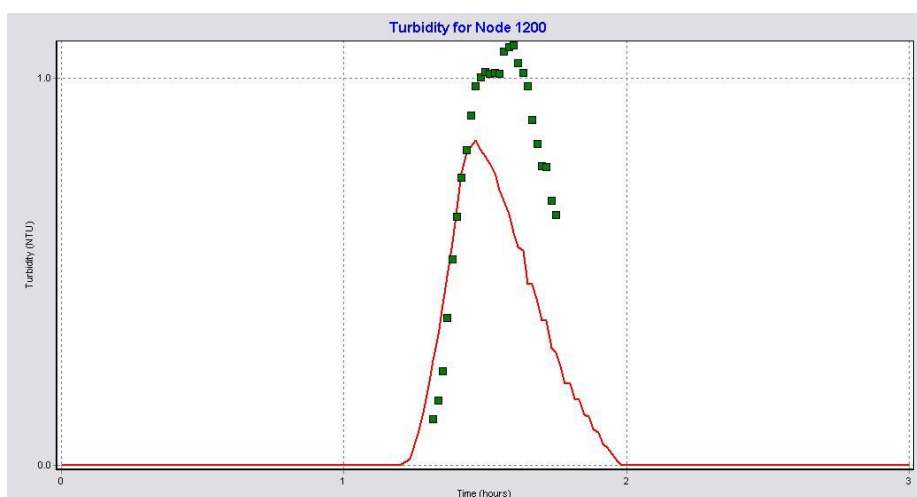


Figura 5-6 – Evolução da turvação ao longo do tempo no ponto de recolha a 1400 m de Jovim após funcionamento da 3ª bomba (9500 m³/h) durante 15-20 minutos na adutora Jovim-Ramalde.

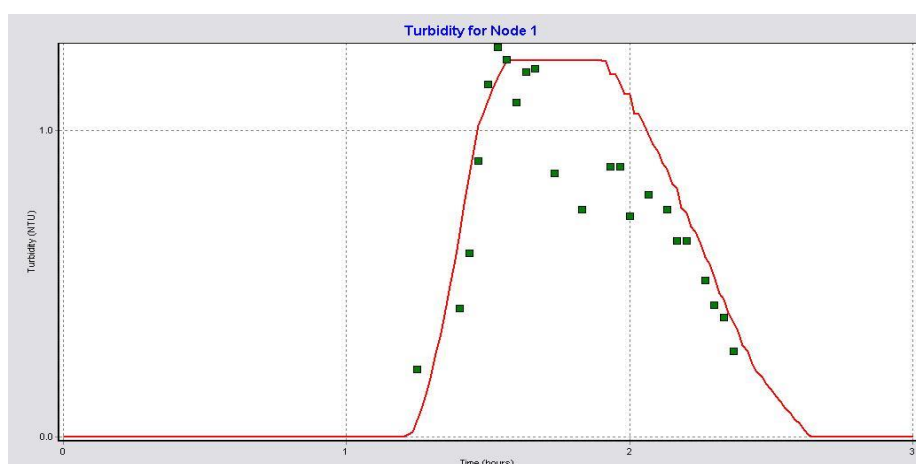


Figura 5-7 – Evolução da Turvação ao longo do tempo no ponto de recolha de Ramalde após funcionamento da 3ª bomba (9500m²/h) durante 15-20 minutos na adutora Jovim-Ramalde.

Nas duas figuras anteriores é visível a verde os valores registados no terreno e a vermelho os valores obtidos pelo modelo PODDS. O ajuste foi bom para os 2 pontos de monitorização e obtido ao fim de 3 iterações. No entanto na Figura 5-6 (ponto de recolha a 1400 m) há um desfasamento entre a simulação e os dados reais e admitiu-se que este pode ter origem no tempo de recolha da amostra.

Este modelo PODDS, raramente foi utilizado em tubagens com diâmetro tão elevado e em redes de distribuição de água de alta pressão. Por conseguinte toda a equipa (ISEP, AdDP, Universidade de Sheffield) ficou satisfeita. Os valores dos parâmetros são apresentados na Tabela 5-3.

Tabela 5-3 – Parâmetros do modelo PODDS obtidos pelo EPANET 2.00.07 bTB2

Parâmetro	Valor
C_{máx}	100
b	1
k	-1
P	0,0001
n	1

Comparativamente aos valores dos parâmetros obtidos em folha de cálculo o valor do parâmetro P foi mais elevado e de acordo com o esperado pelo Dr. *Stewart Husband*. Admite-se que o valor anterior até possa ser o mais próximo da realidade e que na versão turbidity beta do EPANET possa existir uma condição que coloque o valor limite mínimo de P em 0,0001. Fica, pois, a vontade de criar o algoritmo em MSX num próximo trabalho.

5.2. Estimativas do caudal mínimo que origina o valor limite de turvação e do Tempo de retorno à turvação inicial, no ramal Jovim-Ramalde

Um objetivo deste trabalho era a obtenção do caudal mínimo teórico a utilizar no ramal de Jovim-Ramalde que atingisse a turvação de 4 NTU. Para tal foi necessário adicionar ao caudal *base demand* de 1,02 m³/s um caudal de 3,1 m³/s (no total será necessário 4,32 m³/s) para no nó de Ramalde se obter um valor de 4 NTU (valor máximo permitido em águas de consumo, segundo o Decreto-lei 306/2007 de 27 de agosto). Este caudal é muito superior ao utilizado regularmente, visto que só se

utilizam 2 grupos de bombagem a debitar cerca 1,96 m³/s, e ainda, é superior ao caudal obtido no ensaio com 3 grupos de bombagem em simultâneo (2,64 m³/s). Este valor de caudal necessitaria que a 4^a bomba entrasse em funcionamento.

Na Figura 5-8 pode-se ver o resultado da simulação para o caudal de 4,32 m³/s e verificar que o valor de 4 NTU seria atingido ao fim de 17 minutos. Para se voltar a ter uma turvação inferior a 1 NTU seria necessário esperar 4 horas e 8 minutos.

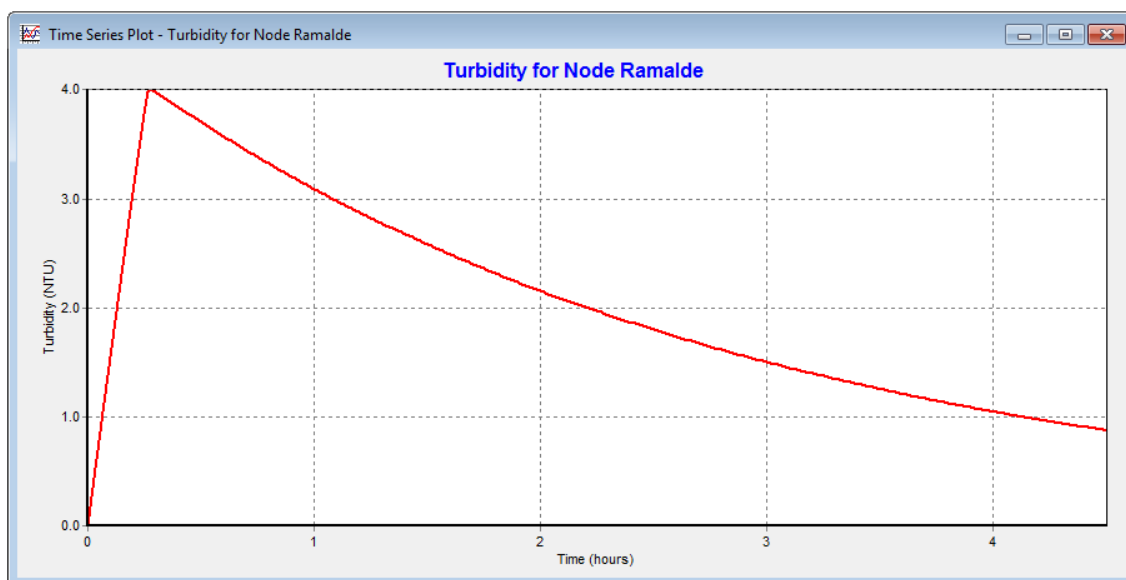


Figura 5-8 – Evolução temporal da turvação simulada para um caudal de 4,32 m³/s.

5.3. Influência da Temperatura

Para o estudo da influência da temperatura realizaram-se simulações alterando a temperatura no Ficheiro INP. A temperatura determinada nos ensaios em campo encontrava-se a 17°C, e decidiu-se escolher outras duas temperaturas 8 e 25°C para se realizar uma comparação. A primeira corresponde à habitual temperatura de água de abastecimento público em tubagens do Reino Unido, e a segunda à temperatura da água em tubagens no Verão de Portugal.

Os resultados das simulações são apresentados nas Figuras 5-10, 5-11, 5-12.

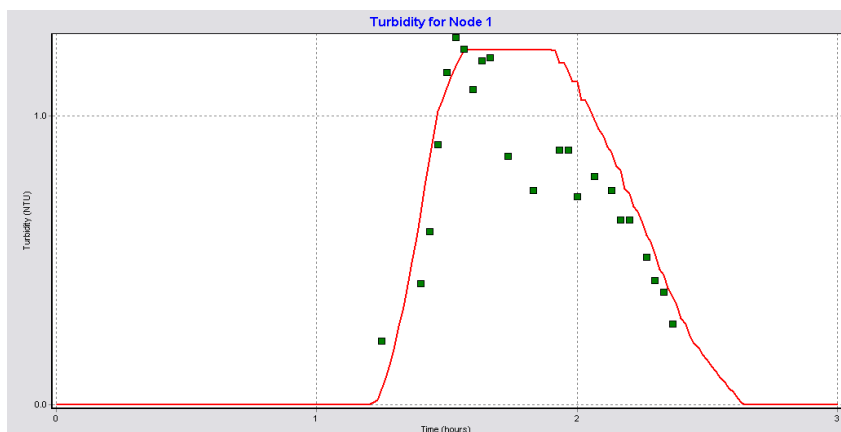


Figura 5-9 – Gráfico da turvação ao longo do tempo, para uma temperatura de 8°C, no ponto de recolha de Ramalde, após funcionamento da 3ªbomba (9500m²/h) durante 15-20 minutos na adutora Jovim-Ramalde.

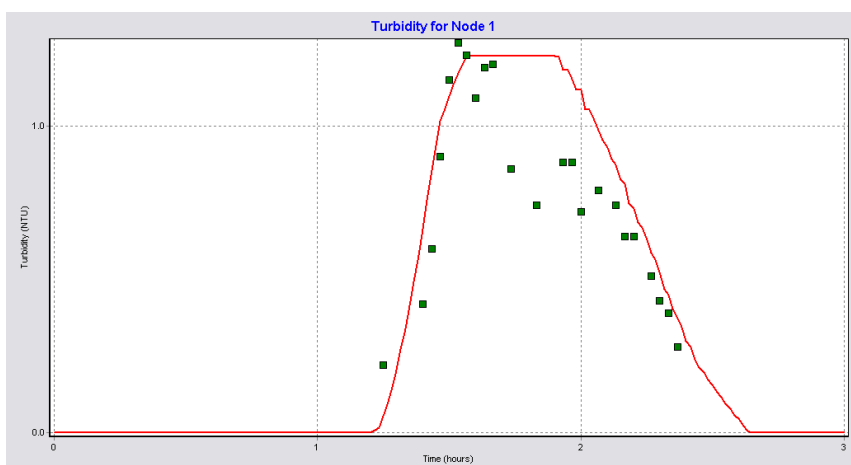


Figura 5-10 – Gráfico da turvação ao longo do tempo, para uma temperatura de 17°C, no ponto de recolha de Ramalde, após funcionamento da 3ªbomba (9500m²/h) durante 15-20 minutos na adutora Jovim-Ramalde..

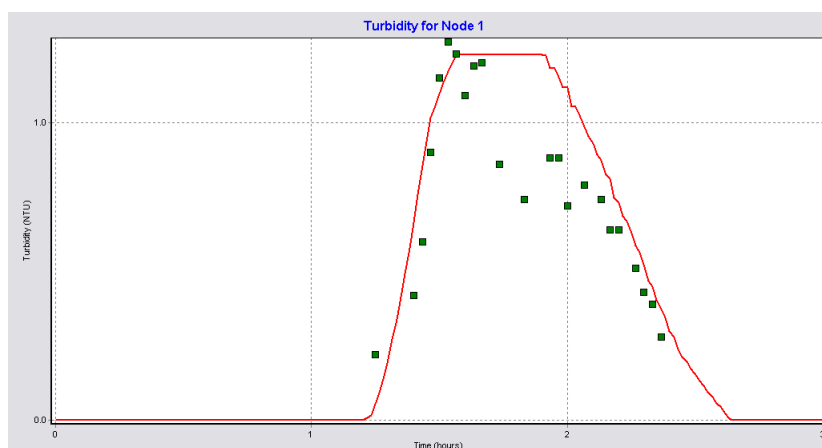


Figura 5-11 – Gráfico da turvação ao longo do tempo, para uma temperatura de 25°C, no ponto de recolha de Ramalde, após funcionamento da 3ªbomba (9500m²/h) durante 15-20 minutos na adutora Jovim-Ramalde..

Como se pode verificar, não existe qualquer variação entre as três figuras. Todavia, poderá ter efeito na regeneração dos depósitos e como podemos ver na Equação 3.6, há dependência da temperatura. Porém, neste estudo decidiu-se não utilizar esta equação.

6. Conclusão

Em suma, estudou-se o fenómeno de deposição e ressuspensão das partículas no interior de tubagens de uma rede de abastecimento de água. E ainda, foi utilizado e verificado o modelo cinético da turvação PODDS associado a deposição de partículas nas tubagens de uma rede de abastecimento de água de alta pressão. Este modelo foi aplicado pela versão turbidity beta do EPANET 2.00.07 bTB2, numa conduta adutora da empresa Águas do Douro e Paiva, S.A.

A calibração foi realizada com ensaios em campo e, ao fim da terceira iteração com atualização da força de coesão, obteve-se os seguintes valores: $C_{\text{máx}}$ igual a 100 NTUm, b e n igual a 1, k igual a $-1 \text{ NTUm}^3/\text{N}$ e, por fim, P igual a $0,0001 \text{ NTUm}^3/\text{N.s}$.

O valor do caudal mínimo teórico que originaria valores de turvação acima dos 4 NTU foi de $4,32 \text{ m}^3/\text{s}$ ($14832 \text{ m}^3/\text{h}$), um caudal muito superior ao utilizado regularmente, com 2 grupos de bombagem, e mesmo superior ao caudal obtido no ensaio com 3 grupos de bombagem em simultâneo. Mantendo este caudal máximo durante 15-20 minutos são necessárias 4 horas e 8 minutos para que o valor de turvação volte a ser inferior a 1 NTU.

A variação da temperatura entre 8 e 25°C não influenciou o valor dos parâmetros obtidos para o modelo PODDS. Todavia, se o modelo incluísse a regeneração dos depósitos os resultados poderiam ser diferentes.

Como sugestões para trabalhos futuros refere-se a validação da calibração do modelo PODDS, ou seja propõe-se a realização de mais ensaios. E ainda, a utilização da Equação 3.6 que inclui a regeneração dos depósitos, a análise de sensibilidade aos parâmetros k e P do modelo e a utilização da extensão MSX do EPANET para se modelar de acordo com PODDS.

Bibliografia

Ackers, J., Brandt, M. and Powell, J. 2001. *Hydraulic characterization of deposits and review of sediment modelling.* UK : Water Industry Research, pp. 23-26.

AWWA. 1999. *Calibration Guidelines for Water Distribution System Modeling.* [ed.] Engineering Computer Applications Committee. EUA : ImTech Conference, American Water Works Association.

Azevedo Netto, J.M. 1998. *Manual de Hidráulica.* 8º. Brasil : Edgar Blucher.

Beleza, Joaquim. 2005. *Simulação das concentrações de cloro residual e tri-halometanos em redes de distribuição de água para consumo humano.* Engenharia Química, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto : Faculdade p. 1, Tese de Mestrado.

Bento, H. 2012. *Simulação da qualidade da água em parte de uma rede de abastecimento ao Grande Porto.* Eng. Química, Instituto Superior de Engenharia do Porto. Porto : ISEP. Tese de Mestrado. pp 5.

Bono, R. 1975. *Eureka! Como foram feitas as grandes invenções.* Barcelona : Labor.

Boxal, I.J. and Saul, A. 2005. *Modeling Discoloration in Potable Water Distribution Systems.* EUA : ASCE - American Society of Civil Engineer. pp. 716-725.

Boxall, J.B. and Husband, S. 2009. *An Introduction and Guide to the PODDS Model.* Department of Civil and Structural Engineering, University of Sheffield. pp. 3-5.

Brown, Paul. 2012. *Guide to PODDS model build and calibration.* Reino Unido, p. 3.

Capelle, Françoise. 2007. *A Água da Vida.* Lisboa : Inapa Edições, pp. 9-15.

Furnass, W.R., et al. 2013. *Modelling both the continual erosion and regeneration of discolouration material in drinking water distribution systems.* Reino Unido.

Heller, Léo and Pádua, Valter L. 2006. *Abastecimento de água para consumo humano.* Belo Horizonte : UFMG, pp. 29-61.

Husband, P.S. and Boxall, J.B. 2011. *Asset deterioration and discolouration in water distribution systems.* s.l. : AWA, pp. 113 - 124. Vol. Water Research 45.

Husband, P.S., Boxall, J.B. and Saul, A.J. 2008. *Laboratory studies investigating the processes leading to discolouration in water distribution networks.* pp. 4310-4318.

Mascarenhas, L. 2011. Google. *Google Images.* [Online] Fevereiro 02, [Cited: Março 07, 2013.] <http://eusoullatino.blogspot.pt/2011/02/aquedutos-romanos.html>.

Mays, Larry W. 2000. *Manual de Sistemas de Distribución de Agua.* 2º. Madrid : McGraw-Hill, pp. 10.1-11.1.

Mendes, Benilde and Santos Oliveira, J.F. 2004. *Qualidade da água para consumo humano.* Lousã : Lidel - edições técnicas, lda, p. 154.

- Neilands, K., Bernats, M. and Rubulis, J. 2012.** *Accumulation and modeling of particles in drinking water pipe fittings*. Riga : Copernicus Publications, Vol. 5. pp 47-57.
- Pedley, S. and Pond, K. 2003.** *Emerging Issues in Water and infections Disease*. Suíça : OMS - World Health Organization.
- Resende, S.C and Heller, L. 2002.** *O saneamento no Brasil. Políticas e Interfaces*. Belo Horizonte : UFMG. p. 310.
- Rossman, Lewis A. 2000.** *EPANET 2.0 Manual de utilizador*. EUA : United States Environmental Protection Agency.
- The Oregon Plan for Salmon and Watersheds. 1999.** *Water Quality Monitoring Guidebook*. Oregon : s.n..
- Vreeburg, J.G. and Boxall, J.B. 2007.** *Discolouration in potable water distribution systems*. Holanda : s.n.. pp. 520-528.
- Vreeburg, J.H.G. and Boxall, J.B. 2007.** *Discololouration in potable water distribution systems: A review*. Reino Unido : Water Research. pp. 519-529. Vol. 41.
- Vreeburg, J.H.G. 2009.** Google. *Google Images*. [Online]. [Cited: Março 07, 2013.] http://www.scielo.org.za/scielo.php?pid=S1816-79502009000200008&script=sci_arttext.
- Walski, T. M., et al. 2010.** *Advance water distribution modeling and management*. EUA : Bentley Institute Press.
- Wu, J., et al. 2003.** *Particles in water distribution system, 5th Progress Report; Part I: Settling, Re-suspension and Transport"*. Melbourne : CRC or Water Quality and Treatment.

Anexos

Anexo A – Imagem Representativa da 1ª Folha de Cálculo em Excel.

Dados Ramalde - Calibração - Microsoft Excel (A Activação do Produto Falhou)

Ficheiro Base Inserir Esquema de Página Fórmulas Dados Rever Ver

Calibri 11 A A

Normal Correcto

Incorrecto Neutro

E43

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE
1																															
2																															
3																															
4																															
5																															
6																															
7																															
8																															
9																															
10																															
11																															
12																															
13																															
14																															
15																															
16																															
17																															
18																															
19																															
20																															
21																															
22																															
23																															
24																															
25																															
26																															
27																															
28																															

Parameters

Cmáx	100
b	1
k	-1
P	7E-10
n	1

Data

D (m)	1,4
At (m2)	1,5393804
As (m2)	11321,04329
L	2574
k	0,001

Initial Turbidity	online measurement	0,11
	portable turbidimeter	0,35

Figura A-1 - Imagem Representativa da 1ª folha de cálculo em Excel.

Anexo B – Imagem Representativa da 2ª Folha de Cálculo em Excel.

Dados Ramalde - Calibração - Microsoft Excel (A Activação do Produto Falhou)

Ficheiro Base Inserir Esquema de Página Fórmulas Dados Reverter Ver

Calibri 11 A A

Cortar Copiar Colar Pincel de Formatação

Moldar Texto

Científico

Normal Correcto Incorrecto Neutro

Formatação Condicional Formatar como Tabela

Inserir Eliminar Formatar

Área de Transferência Tipo de Letra Alinhamento Número Estilos Células

U7 fx 0,00000007

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X
1																								
2																					Parameters			
3																					Obtido			
4		time (h)	Turvação (NTU)	Caudal (m ³ /h)	Flow (m ³ /s)	v (m/s)	Re	Eq. F	f	hd	S ₀	Ta	Time (s)	C (NTUm)	C (NTUm ³)	τ's (N/m2)	R (NTUm/s)	ΔN		Cmáx				
5		15:15	0,22	7345	2,04	1,33	1855545	-0,00008	0,01834	3,02	2,16	7403	0	0,000	0	7403	0	0		b	1			
6		15:24	0,42	9565	2,66	1,73	2416376	-0,00007	0,01829	5,11	3,65	12520	540	0,053	603	11849	4,69E-05	0,2		k	-0,1292			
7		15:26	0,6	9013	2,50	1,63	2276926	-0,00007	0,01830	4,54	3,24	11123	660	0,088	991	9922	8,40E-05	0,38		P	7,00E-08			
8		15:28	0,9	7029	1,95	1,27	1775714	-0,00008	0,01835	2,77	1,98	6783	780	0,121	1371	5107	1,17E-04	0,68		n	1			
9		15:30	1,15	6938	1,93	1,25	1752725	-0,00008	0,01835	2,69	1,92	6609	900	0,176	1995	4348	1,58E-04	0,93						
10		15:32	1,27	6397	1,78	1,15	1616054	-0,00008	0,01837	2,29	1,64	5625	1020	0,203	2302	3270	1,65E-04	1,05		2 - Data				
11		15:34	1,23	3711	1,03	0,67	937498	-0,00009	0,01854	0,78	0,56	1911	1140	0,128	1445	597	9,20E-05	1,01		D (m)	1,4			
12		15:36	1,09	3681	1,02	0,66	929920	-0,00009	0,01854	0,77	0,55	1880	1260	0,124	1404	758	7,86E-05	0,87		At (m2)	1,5393804			
13		15:38	1,19	3656	1,02	0,66	923604	-0,00009	0,01854	0,76	0,54	1855	1380	0,147	1668	612	8,70E-05	0,97		As (m2)	11321,04329			
14		15:40	1,2	3668	1,02	0,66	926635	-0,00009	0,01854	0,76	0,54	1867	1500	0,162	1834	607	8,82E-05	0,98		L	2574			
15		15:44	0,86	3659	1,02	0,66	924362	-0,00009	0,01854	0,76	0,54	1858	1740	0,134	1521	1037	5,75E-05	0,64		k	0,001			
16		15:50	0,74	3673	1,02	0,66	927899	-0,00009	0,01854	0,76	0,55	1872	2100	0,140	1586	1203	4,69E-05	0,52		Initial Turbidity		online measurement	0,11	
17		15:56	0,88	3662	1,02	0,66	925120	-0,00009	0,01854	0,76	0,54	1861	2460	0,195	2202	1014	5,93E-05	0,66			portable turbidimeter	0,35		
18		15:58	0,88	3664	1,02	0,66	925625	-0,00009	0,01854	0,76	0,54	1863	2580	0,204	2311	1015	5,93E-05	0,66						
19		16:00	0,72	3670	1,02	0,66	927141	-0,00009	0,01854	0,76	0,54	1869	2700	0,175	1982	1226	4,50E-05	0,5						
20		16:04	0,79	3676	1,02	0,66	928656	-0,00009	0,01854	0,76	0,55	1875	2940	0,209	2372	1141	5,14E-05	0,57						
21		16:08	0,74	3675	1,02	0,66	928404	-0,00009	0,01854	0,76	0,55	1874	3180	0,212	2402	1204	4,69E-05	0,52						
22		16:10	0,64	3683	1,02	0,66	930425	-0,00009	0,01854	0,77	0,55	1882	3300	0,191	2161	1340	3,80E-05	0,42						
23		16:12	0,64	3681	1,02	0,66	929920	-0,00009	0,01854	0,77	0,55	1880	3420	0,198	2238	1338	3,79E-05	0,42						
24		16:16	0,51	3670	1,02	0,66	927141	-0,00009	0,01854	0,76	0,54	1869	3660	0,168	1903	1496	2,61E-05	0,29						
25		16:18	0,43	3678	1,02	0,66	929162	-0,00009	0,01854	0,77	0,55	1877	3780	0,147	1661	1606	1,90E-05	0,21						
26		16:20	0,39	3676	1,02	0,66	928656	-0,00009	0,01854	0,76	0,55	1875	3900	0,137	1553	1656	1,53E-05	0,17						
27		16:22	0,28	3697	1,03	0,67	933962	-0,00009	0,01854	0,77	0,55	1896	4020	0,102	1156	1819	5,44E-06	0,06						
28																								

Figura B-1 - Imagem Representativa da 2ª folha de cálculo em Excel.

Anexo C – Exemplo do conteúdo de um Ficheiro INP, da adutora Jovim-Ramalde

```

[TITLE]

[JUNCTIONS]
;ID          Elev          Demand          Pattern
1200         0             0               Base           ;
1            0             1               Base           ;

[RESERVOIRS]
;ID          Head          Pattern
4243         40
;

[TANKS]
;ID          Diameter      Elevation      InitLevel      MinLevel      MaxLevel
;ID          Diameter      MinVol         VolCurve
;

[PIPES]
;ID          Diameter      Node1          Node2          Length
;ID          Diameter      Roughness      MinorLoss      Status
1            1            4243          1200          1000          1400
2            1            1200          1             1574          1400
;ID          Diameter      Node1          Node2          Status
1            1            0             Open          ;
2            1            1200          1             Open          ;

[PUMPS]
;ID          Node1          Node2          Parameters

[VALVES]
;ID          Setting      Node1          Node2          Diameter      Type
;ID          Setting      MinorLoss

[TAGS]

[DEMANDS]
;Junction    Demand          Pattern          Category
1200         0             Base            ;
1200         0             test            ;
1            1             Base            ;
1            1             test            ;

[STATUS]
;ID          Status/Setting

[PATTERNS]
;ID          Multipliers
;
1            1
;
Daily 105    100          105          103          106          104
Daily 115    110          112          108          112          113
Daily 180    120          135          170          180          190
Daily 160    175          160          155          150          150
Daily 150    170          173          169          170          155
Daily 160    140          144          150          152          157
Daily 164    165          180          175          170          165
Daily 112    150          148          146          140          120
;
Step 1      0             0             0             0             1
Step 0      1             1             0             0             0
Step 1      0             0             0             0             1
Step 0      1             1             0             0             0

```

```

Step      0      0      0      0      0      0
Step      1      0      0      0      0      1
Step      1      1      1      0      0      0
Step      0      0      0      0      0      0
;
Base      1020
;
test      0      0      0      0      0      0
test      0      0      0      0      0      0
test      0      0      0      0      0      0
test      0      0      0      0      0      0
test      0      0      0      0      0      0
test      0      0      0      0      0      0
test      0      0      0      0      0      0
test      200     800     1100    1260    1380
test      1520    1637    1484     933     907     757
test      11      0      0      0      0      0
test      0      0      0      0      0      0
test      0      0      0      0      0      0
test      0      0      0      0      0      0
test      0      0      0      0      0      0
test      0      0      0      0      0      0
test      0      0      0      0      0      0
test      0      0      0      0      0      0
test      0      0      0      0      0      0
test      0      0      0      0      0      0
test      0      0      0      0      0      0
test      0      0      0      0      0      0

[CURVES]
;ID          X-Value      Y-Value
[CONTROLS]
[RULES]
[ENERGY]
Global Efficiency  75
Global Price      0
Demand Charge     0

[EMITTERS]
;Junction      Coefficient

[QUALITY]
;Node          InitQual

[TURBIDITY]
;Pipe ID      Max Tb Vol (Cmax)    Yield (Init)    Gradient (k)    k order (b)
              Rate of supp. coeff. (P)      P order (n)     Regen. coeff. (P')  Regen. order
(1)
1             0.0001          100             1.022224        -1              1
              0              ;              0               0              0
2             0.0001          100             1.022217        -1              1
              0              ;              0               0              0

[SOURCES]
;Node          Type      Quality      Pattern

[REACTIONS]
;Type          Pipe/Tank      Coefficient

[REACTIONS]

```

Order Bulk	1
Order Wall	1
Global Bulk	0
Global Wall	0
Limiting Potential	0
Roughness Correlation	0

[MIXING]

;Tank	Model
-------	-------

[TIMES]

Duration	3:00
Hydraulic Timestep	0:02
Quality Timestep	0:01
Pattern Timestep	0:02
Pattern Start	0:00
Report Timestep	0:01
Report Start	0:00
Start ClockTime	12 am
Statistic	NONE

[REPORT]

Status	No
Summary	No
Page	0

[OPTIONS]

Units	LPS
Headloss	D-W
Specific Gravity	1
Viscosity	1
Trials	40
Accuracy	0.001
Unbalanced	Continue 10
Pattern	1
Demand Multiplier	1.0
Emitter Exponent	0.5
Quality	Turbidity mg/L
Diffusivity	1
Tolerance	0.01
Temperature	17

[COORDINATES]

;Node	X-Coord	Y-Coord
1200	2987.55	8284.92
1	8077.46	8284.92
4243	-885.20	8284.92

[VERTICES]

;Link	X-Coord	Y-Coord
-------	---------	---------

[LABELS]

;X-Coord	Y-Coord	Label & Anchor Node
----------	---------	---------------------

[BACKDROP]

DIMENSIONS	0.00	0.00	10000.00
10000.00			
UNITS	None		
FILE			
OFFSET	0.00	0.00	

[END]

Anexo D – Conteúdo de um ficheiro de calibração, para o ponto de recolha de Ramalde

ID	Tempo	Turvação
1	01:15	0.22
1	01:24	0.42
1	01:26	0.6
1	01:28	0.9
1	01:30	1.15
1	01:32	1.27
1	01:34	1.23
1	01:36	1.09
1	01:38	1.19
1	01:40	1.2
1	01:44	0.86
1	01:50	0.74
1	01:56	0.88
1	01:58	0.88
1	02:00	0.72
1	02:04	0.79
1	02:08	0.74
1	02:10	0.64
1	02:12	0.64
1	02:16	0.51
1	02:18	0.43
1	02:20	0.39
1	02:22	0.28