

MODELAÇÃO AVANÇADA DE PLUMAS DE EXUTORES SUBMARINOS USANDO SISTEMAS BASEADOS EM VSAs ADVANCED MODELING OF SEWAGE OUTFALL PLUMES USING AUVs BASED SYSTEMS

PATRÍCIA RAMOS ⁽¹⁾, MÁRIO VALENTE NEVES ⁽²⁾

⁽¹⁾ Assistente, ISCAP,

Rua Jaime Lopes Amorim, s/n, 4465-004, S. Mamede Infesta, Portugal, patricia@iscap.ipp.pt

⁽¹⁾ Investigadora, ISR-Porto,

Rua Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, Portugal, patricia@fe.up.pt

⁽²⁾ Professor Associado, FEUP,

Rua Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, Portugal, mjneves@fe.up.pt

Resumo

Este trabalho consiste na utilização de um veículo submarino autónomo (VSA) para a obtenção de dados das propriedades físicas de plumas de efluente tendo por objectivos a caracterização da dispersão e a estimação da diluição. Uma campanha oceanográfica utilizando um VSA foi levada a cabo em 30 Julho de 2002 para estudar a forma e a diluição da pluma do exutor submarino de S. Jacinto (Aveiro). Por forma a reduzir-se a incerteza acerca da localização da pluma e centrar-se a missão do veículo apenas na zona de mistura inicial, foram usadas previsões de um modelo de dispersão, baseadas em observações da velocidade e direcção das correntes e estratificação da densidade, obtidas em tempo real. O mapeamento da dispersão da pluma usando os dados do veículo foi obtido criando um sistema de processamento de dados que utiliza a técnica do método de colocação mínimos quadrados (MCMQ). Os resultados do MCMQ para a salinidade permitem identificar de forma não-ambígua a pluma e observar a sua dispersão ao longo da direcção da corrente. A diluição foi estimada representando os dados de temperatura e salinidade num diagrama T-S, com linhas de mistura inicial entre as características T-S do efluente e das águas ambientais. Os resultados indicam que a diluição inicial foi de, pelo menos, 30:1.

Palavras-chave: monitorização, dispersão, diluição, avaliação de impacte ambiental

Abstract

This work concerns the use of an autonomous underwater vehicle (AUV) to concurrently measure physical properties of a sewage outfall plume in order to characterize dispersion in the near field and estimate minimum dilution. An oceanographic campaign was performed on July 30, 2002 to study the shape and dilution of S. Jacinto (Aveiro) sewage plume using an AUV. In order to reduce the uncertainty about plume location and concentrate the vehicle mission only in the hydrodynamic mixing zone, outputs of a near field prediction model based on *in situ* measurements of current speed and direction and density stratification, obtained in real-time. To effectively map the dispersion of the effluent using the AUV data, an innovative data processing was created applying the Least Squares Collocation Method (LSCM) technique. LSCM results for salinity enable to identify unambiguously the effluent plume and observe its dispersion downstream. Dilution was estimated using temperature and salinity, and their representation on a T-S diagram, with initial mixing lines between wastewater and ambient waters. The results indicate that dilution was at least 30:1.

Keywords: monitoring, dispersion, dilution, environmental impact assessment

1. Introdução

Os exutores submarinos são concebidos para promover a capacidade de assimilação natural dos oceanos para dispersar as águas residuais urbanas e industriais com impacte mínimo. Isto é conseguido através de um vigoroso processo de mistura inicial seguido de dispersão oceânica sob o efeito de correntes que variam quer no espaço quer no tempo.

Habitualmente, estes processos de mistura, em combinação com a mortalidade bacteriológica, resultam numa rápida redução das concentrações dos poluentes para níveis próximos dos do meio receptor. No entanto, os processos

físicos e biológicos costeiros associados ao processo de mistura, altamente dinâmicos e complexos, e intimamente ligados com a concentração e composição dos efluentes, são, ainda, em muitas instâncias, pouco conhecidos. Consequentemente, o modo como os efluentes se dispersam e como modificam e são modificados pelo ambiente costeiro permanece em muitos aspectos desconhecido e imprevisível.

Grandes esforços têm sido recentemente levados a cabo a nível mundial, no sentido de melhorar as formas de monitorizar e caracterizar o comportamento da pluma de efluente proveniente dos exutores submarinos (Wu *et al.*, 1994; Petrenko *et al.*, 1998; Petrenko *et al.*, 2000; Jones *et al.*,

2001; Carvalho *et al.*, 2002; Roberts *et al.*, 2002). As várias abordagens que têm sido usadas, com diferentes resoluções espacio-temporais, não têm, no entanto, estimado de forma adequada a diluição e a extensão espacial das plumas, não avaliando consequentemente os reais potenciais impactes das descargas. As dificuldades associadas a este tipo de monitorização são essencialmente devidas aos elevados custos envolvidos, uma grande variabilidade das condições oceanográficas, nomeadamente a estratificação da densidade e a intensidade e direcção das correntes, e a grande área a monitorizar, não sendo fácil a obtenção de observações fiáveis (Faisst *et al.*, 1990).

Uma correcta e detalhada representação da complexidade oceanográfica está ainda para além da capacidade dos modelos de previsão já existentes (Petrenko *et al.*, 1998, Ramos 2005). E mesmo em relação ao processo hidrodinâmico da mistura, apesar destes modelos preverem já de uma forma aproximada as características essenciais da pluma em regime estacionário, existem ainda aspectos tais como a intermitência, observada *in situ*, que não são considerados.

2. Monitorização

As técnicas tradicionais existentes para observação subaquática são habitualmente dispendiosas e não oferecem uma cobertura satisfatória da dispersão do efluente, apesar dos requisitos de acompanhamento ambiental deste tipo de poluição estarem a tornar-se cada vez mais exigentes, nomeadamente através da Nova Directiva-Quadro da Água em vigor desde Dezembro de 2000.

Basicamente existem três formas distintas de monitorizar as plumas de efluente provenientes de exutores submarinos: recolhendo amostras, obtendo dados das propriedades físicas e bio-ópticas da descarga ou usando traçadores artificiais.

A recolha de amostras e pós-análise laboratorial é a técnica de monitorização tradicionalmente mais utilizada. Periodicamente, várias amostras de águas são recolhidas em pontos de uma grelha tridimensional na vizinhança do exutor e nas zonas balneares próximas sendo posteriormente analisados em laboratório vários indicadores de poluição, nomeadamente parâmetros microbiológicos, físico-químicos, metais pesados, etc (Dec. Lei Nº 152/97 de 19 Junho - Directiva 91/271/CEE, Dec. Lei 74/90 de 7 Março, Dec. Lei 236/98 de 1 Agosto - Directiva 76/160/CEE de 8 Dezembro de 1975). Em contraste com as técnicas de observação *in situ*, esta forma pode eventualmente fornecer directamente potenciais indicadores de risco, mas para além de não permitir uma detecção em tempo real, possui uma baixa resolução espacial, uma vez que está habitualmente limitada a um conjunto pequeno de pontos. Dependendo da localização pré-definida destes pontos em relação à dispersão da pluma no instante da observação pode eventualmente não capturar ou subestimar características da mesma.

A monitorização das plumas de efluente pode, em princípio, ser feita através da detecção de componentes existentes na descarga. Vários estudos de campo já levados

a cabo utilizaram medidas de temperatura, salinidade, turbidez e clorofila para caracterizar e determinar a extensão espacial de plumas de efluente. Esta detecção é dificultada quando existem no meio elevados gradientes do traçador natural usado na observação sendo ténue a diferença para os valores observados na pluma. Uma vez que, em princípio, a redução das concentrações dos poluentes para níveis próximos dos do meio receptor é rápida, este método tem também limitações no alcance da detecção. Mesmo assim, esta é ainda uma das técnicas de monitorização mais facilmente utilizada quando surgem zonas contaminadas e uma observação mais eficaz é necessária. A exploração de métodos de fluorescência espectral na detecção de traçadores naturais constitui um caminho promissor para a observação de potenciais características únicas do efluente.

Quando uma fonte de poluição, tal como as plumas de efluente, está sob suspeita e várias dúvidas ambientais têm de ser clarificadas, utilizam-se habitualmente traçadores artificiais, que incluem substâncias radioactivas, substâncias fluorescentes ou partículas, injectados no efluente na ETAR ou no meio ao nível dos difusores. Apesar de ser uma técnica altamente eficaz, uma vez que permite a detecção do traçador com elevada exactidão até níveis muito baixos, sendo possível a estimação da diluição a distâncias superiores do difusor, não é prática para monitorização de rotina. Estes estudos envolvem habitualmente elevados custos, uma logística complexa e implicam potenciais impactes negativos no meio.

Quer um melhor conhecimento do processo hidrodinâmico da mistura, essencial para a modelização, quer um entendimento empírico correcto da dinâmica da descarga, necessário para a avaliação da eficiência do exutor em termos de diluição e desenvolvimento da climatologia da pluma, que constitui uma caracterização do comportamento do efluente sob o espectro das condições oceanográficas existentes (Roberts, 1999), requerem observações não ambíguas de elevada resolução espacio-temporal.

Quer um melhor conhecimento do processo hidrodinâmico da mistura, essencial para a modelização, quer um entendimento empírico da dinâmica da descarga, necessário para a avaliação da eficiência do exutor em termos de diluição e desenvolvimento da climatologia da pluma (que constitui uma caracterização do comportamento do efluente sob o espectro das condições oceanográficas existentes), requerem observações não ambíguas de elevada resolução espacio-temporal.

Devido à sua fácil logística, custos reduzidos por operação, elevada cobertura espacial, redução dos efeitos de desfasamento espaciais e temporais e capacidade de recolha de dados de forma adaptativa, os veículos submarinos autónomos constituem uma tecnologia particularmente poderosa para a detecção e mapeamento de plumas de efluente provenientes de exutores submarinos (Ramos *et al.*, 2000a; Fletcher, 2001). Estes veículos subaquáticos caracterizam-se por se movimentarem de forma autónoma, isto é, sem controlo directo externo, transportando um conjunto relevante de sensores para caracterizar o meio e para se localizarem. Devido aos desenvolvimentos ao nível

da operacionalidade e fiabilidade destes veículos, as suas vantagens têm vindo gradualmente a aumentar tendo sido já levadas a cabo várias missões científicas e militares que forneceram dados de elevada qualidade (Yu *et al.*, 1994; Robinson *et al.*, 1999).

De seguida descreve-se uma missão de monitorização ao exutor submarino de S. Jacinto levada a cabo em 30 Julho de 2002 usando um VSA da classe REMUS (ver Figura 1). Esta missão teve como objectivos a caracterização da dispersão da pluma e a estimação da sua diluição. Os resultados obtidos demonstram que, através da utilização de VSAs, é possível obterem-se dados de elevada qualidade das propriedades físicas e bio-ópticas das plumas de efluente de uma forma extremamente eficiente.

3. ESPEIFICAÇÃO DA MISSÃO DE MONITORIZAÇÃO

3.1. Veículo Submarino Autónomo

A Figura 1 mostra o VSA da classe REMUS (Alt *et al.*, 1994) que foi utilizado na missão de monitorização ao exutor submarino de S. Jacinto levada a cabo em Julho de 2002.



Figura 1. Veículo submarino autónomo.

Este veículo tem o corpo central de forma cilíndrica, com cerca de 1.5 m de comprimento e 20 cm de diâmetro. O peso no ar é de cerca de 30 kgf, podendo operar até à profundidade de 200 m. O veículo é constituído por três partes distintas: a zona frontal, que integra os sensores que contactam com o meio aquático, o corpo central hermético, contendo os dispositivos electrónicos, e a cauda que contém o sistema de propulsão.

Durante as missões, o veículo desloca-se sem qualquer ligação física com o exterior e a energia é fornecida por um conjunto de baterias recarregáveis. O motor de propulsão permite navegar a uma velocidade máxima de 4 nós (aproximadamente 2 m/s ou 7.2 Km/h), existindo lemes verticais para controlo de direcção e lemes horizontais para controlo de profundidade. A duração máxima das missões é de cerca de 10-12 horas à velocidade nominal de 2-3 nós, ou seja, é possível percorrer entre X e Y 30 milhas marítimas (cerca de 56 km). Atendendo às suas características físicas, pode ser facilmente transportado e lançado a partir da costa ou de uma pequena embarcação, não necessitando de equipamento especial de apoio. Apesar do seu pequeno tamanho, pode ser reconfigurado para uma grande variedade de sensores e o seu comprimento pode ainda ser aumentado para permitir um acréscimo de carga útil.

O sistema de controlo responsável pela execução de uma determinada missão requer o conhecimento, em cada instante e com alguma precisão, da posição do veículo no meio subaquático. Para tal, existe um conjunto de faróis acústicos previamente colocados na região de operação, cuja posição é conhecida. O VSA Isurus pode localizar-se através da troca de sinais acústicos com esses faróis. O veículo interroga cada um dos faróis a uma dada frequência e estes respondem com um sinal a outra frequência. Medindo o tempo que decorre entre o envio de um sinal e a recepção da resposta, determina-se a distância a cada um dos faróis, o que permite, através de triangulação, estimar a sua posição.

Para além da sua posição no plano horizontal, o VSA determina a sua orientação através de uma bússola digital e a sua profundidade através de um sensor de pressão. O algoritmo de controlo determina o erro na trajectória (10 vezes por segundo) e gera comandos para os actuadores respectivos (ex. rodar os lemes verticais para compensar deslocamentos provocados pela corrente).

A execução de uma missão com este VSA engloba 4 etapas fundamentais:

1. “Setup” operacional. Chegados à região de operação é necessário determinar, de acordo com as características batimétricas, o local apropriado para a colocação dos faróis acústicos. Após a fixação das bóias de sinalização, tendo em vista a sua recolha posterior e as características da missão, determina-se a sua localização exacta, utilizando um GPS diferencial ou por triangulação a referências naturais.
2. Programação da missão. Determina-se o percurso que o veículo vai efectuar e especifica-se a missão a ser desempenhada através da selecção de um conjunto de manobras e tarefas pré-definidas. Nesta altura, o veículo encontra-se ligado por um cabo a um computador (normalmente, um computador portátil) através do qual é efectuado um diagnóstico inicial.
3. Execução da missão. Uma vez desligado do computador de apoio, o VSA é colocado na zona inicial da missão, de onde parte. No final da missão, o veículo volta à superfície, de onde é recolhido.
4. Análise da missão. O cabo é novamente ligado entre o computador e o veículo, para transferir os dados que foram armazenados.

Deve-se realçar que apesar de ser possível comunicar em ambientes subaquáticos através de ondas sonoras, os dispositivos que o permitem têm um custo muito elevado e uma taxa de transmissão relativamente baixa, pelo que nas utilizações mais vulgares os VSAs cumprem as missões sem qualquer interferência por parte do operador.

Para a missão em causa o VSA transportou um altímetro, que forneceu medidas da altura ao fundo, e um CTD (conductivity, temperature, depth) que forneceu medidas de condutividade, temperatura e pressão a uma frequência de 2.4Hz. A partir dos dados de condutividade,

temperatura e pressão é possível inferir os valores da salinidade e da densidade (Millero *et al.*, 1980).

Aplicações de Software para apoio na Monitorização

A zona de diluição inicial da pluma no meio é muito variável e dependente das condições de estratificação da densidade e intensidade e direcção das correntes (Ramos *et al.*, 2000b). Por forma a reduzir-se a incerteza acerca da localização da pluma e centrar-se a missão do veículo na zona de mistura inicial, foram usadas previsões de um modelo de dispersão no campo próximo (Roberts *et al.*, 1989), baseadas em observações da velocidade e direcção das correntes e estratificação da densidade, obtidas em tempo real, tendo sido possível especificar-se a missão do veículo durante a campanha de monitorização (Ramos *et al.*, 2002).

Uma aplicação integrada (ver Figura 2), desenvolvida para ser utilizada em campo, determina, de forma adaptativa e em tempo real, a trajectória mais eficiente da missão de monitorização do VSA, de acordo com as condições ambientais, tendo em conta quer as previsões do modelo, quer os requisitos de navegação do veículo.

A Figura 2 mostra uma das etapas da determinação das especificações da missão de monitorização ao exutor submarino de S. Jacinto através da aplicação referida. Numa primeira fase foi obtido um perfil da intensidade e direcção das correntes horizontais, utilizando um ADCP externo (modelo Workhorse Sentinel 600Hz, RDI Instruments), num ponto localizado 400 m a Norte do ponto médio do difusor, na direcção paralela à costa (N 40° 41.1782' W 8° 46.6547' WGS84 datum). Utilizando esta informação acerca das correntes, a aplicação especificou o ponto de recolha do perfil de CTD, a uma distância de 400 m do ponto médio do difusor, na direcção oposta à da corrente média (N 40° 41.1910' W 8° 46.7709' WGS84 datum).

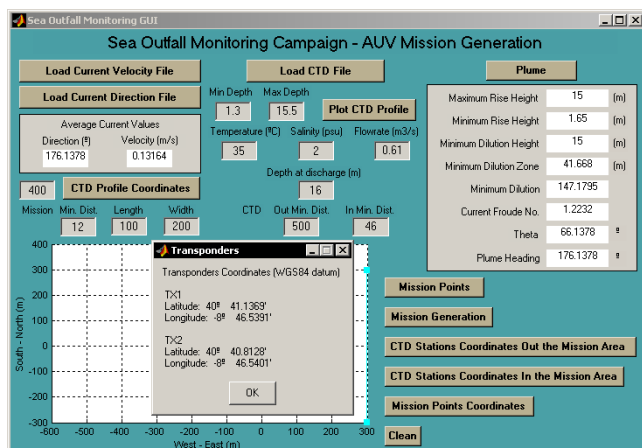


Figura 2. Etapa da determinação das especificações da missão de monitorização.

Uma vez carregados os dados do perfil de CTD, a profundidade da descarga (16 m), e as características do efluente (temperatura = 35°, salinidade = 2 psu, e caudal = 0.61 m³/s) a aplicação determinou o posicionamento da pluma na coluna de água, correndo o modelo de dispersão no campo próximo, em tempo real, com as condições ambientais obtidas. (As características do difusor já tinham sido introduzidas após o arranque da aplicação.)

De acordo com as previsões do modelo, a pluma encontrava-se estabilizada à superfície, ocupando

praticamente toda a coluna de água. Usando, quer os dados do comprimento e largura da zona de mistura inicial provenientes do modelo, quer os requisitos de navegação do veículo, a aplicação determinou a trajectória da missão do VSA. Esta trajectória consistiu em seis linhas paralelas de 200 m de comprimento, distanciadas de 20 m, repetidas aos 2, 4, 6, 8, 10 e 12 m de profundidade. Estas linhas encontravam-se centradas no ponto médio do difusor, a uma distância mínima de 12 m, orientadas numa direcção perpendicular à direcção da corrente média.

Esta informação foi passada a uma segunda aplicação (ver Figura 3) que gerou de forma automática o ficheiro da missão. Os detalhes da missão, determinados de forma automática, podiam, se necessário, ser alterados através desta aplicação gerando-se um novo ficheiro, de acordo com as alterações efectuadas. Através desta aplicação é também possível visualizar a 3D trajectória do veículo. A cor azul, vermelho, azul claro, rosa preto e amarelo estão respectivamente indicadas as zonas da trajectória a efectuar aos 2, 4, 6, 8, 10 e 12 m de profundidade.

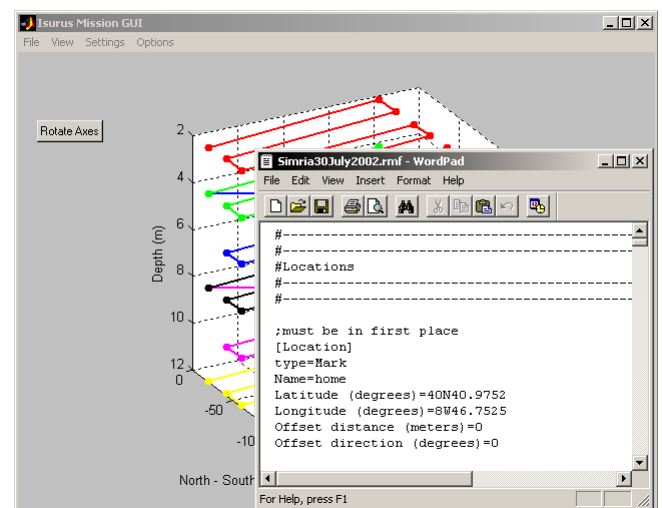


Figura 3. Geração do ficheiro da missão do veículo.

Após a passagem do ficheiro da missão para o veículo, este e os faróis acústicos foram colocados na água. A missão do veículo durou aproximadamente 1 hora e 52 minutos, iniciando-se aproximadamente às 14h00 GMT. No final da missão, o veículo e os faróis acústicos foram recolhidos da água tendo de seguida sido descarregados os dados obtidos para um computador.

4. RESULTADOS

A Figura 4 mostra a azul a trajectória realmente efectuada pelo VSA e a vermelho a trajectória pretendida. A posição da trajectória efectuada foi estimada posteriormente por um algoritmo adequado, utilizando informação proveniente do sistema de navegação do veículo (Matos *et al.*, 2003). Esta posição é utilizada para localizar espacialmente os dados ambientais obtidos.

Em relação às diferenças entre a trajectória pretendida e a realmente efectuada, apenas se constatou um aumento da distância mínima, referida anteriormente, de 12 para 20 m, e um desvio da trajectória aos 4 m de profundidade nas secções 3 e 6 (ver Figura 4). Estes desvios deveram-se à

fortes correntes que se fizeram sentir. Saliente-se a capacidade do sistema de navegação do veículo de corrigir a trajectória para a posição pretendida.

Durante a missão o veículo deslocou-se horizontalmente e verticalmente a uma velocidade aproximadamente constante de 1m/s. Os dados de CTD foram recolhidos a uma frequência de 24 Hz. Assim, a resolução horizontal foi de 0.4 m. (Definimos aqui resolução horizontal como sendo a distância aproximada entre dois pontos consecutivos, medidos aproximadamente à mesma profundidade.) A resolução vertical variou ao longo da missão, devido à influência das correntes, no entanto, centrou-se sempre entre 1 e 2 m. (Definimos aqui resolução vertical como sendo a distância vertical entre dois pontos na coluna de água, medidos aproximadamente no mesmo ponto (X,Y), mas em profundidades consecutivas.)

Em relação à precisão das estimativas da posição do veículo, de extrema importância para a localização o mais exacta possível das medidas, pode afirmar-se que o erro máximo estimado no plano horizontal foi inferior a 5 m. Este erro pode ainda ser diminuído com pequenos ajustes no processo de colocação do veículo e faróis acústicos na água.

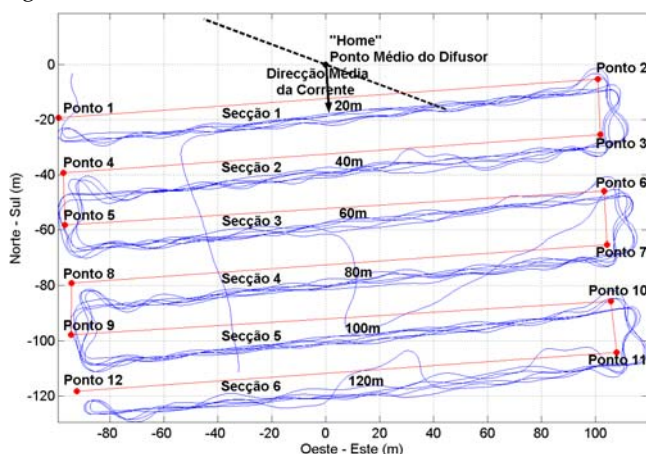


Figura 4. Trajectória estimada do VSA na zona da dispersão.

O perfil de ADCP, obtido entre os 1.55 e os 14.05 m de profundidade, em intervalos de 0.5 m, indicou velocidades entre 0.1 e 0.25 m/s com média igual 0.132 m/s, e uma direcção predominante para Sul (entre 1.55 e os 8.55 m) e para entre SE e SSE (entre os 8.55 m e o fundo) com média igual a 176.14°.

Na Figura 5 mostram-se os dados de temperatura, salinidade, densidade e turbidez do perfil realizado para a se correr o modelo de dispersão em tempo real. Estes dados são representativos das condições de estratificação da coluna de água sem a influência da presença da pluma. De acordo com estes dados a coluna de água estava pouco estratificada devido às fracas variações da temperatura e da salinidade. A diferença do valor da temperatura entre a superfície e o fundo era cerca de 1.2°C com a maior variação a ocorrer numa termoclina que se estendeu aproximadamente entre 1 e 10 m de profundidade. O perfil de salinidade mostrou alguma variabilidade, sendo a maior diferença registada de 0.12 psu. A diferença do valor da densidade entre a superfície e o fundo era cerca de 0.35 ot

com a maior variação, aproximadamente linear, a estender-se entre os ~3 e 13 m.

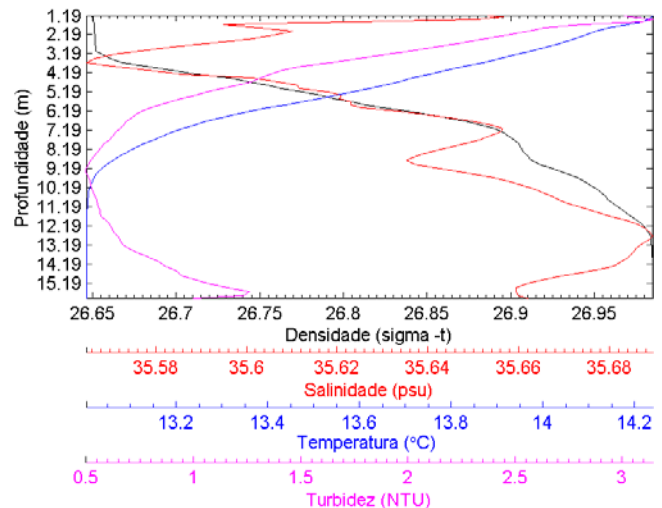


Figura 5. Perfil vertical de CTD integrado no modelo.

Caracterização Espacial da Pluma

Para se obter um mapeamento da dispersão da pluma usando os dados de CTD do veículo foi criado um sistema de processamento de dados inovador, aplicando um método de colocação de mínimos quadrados (MCMQ). Os detalhes deste método podem ser encontrados em Ramos (2005) e Zhang *et al.* (2001). Este processamento foi integrado num sistema automático de tratamento de dados modular, que pode ser reutilizado em campanhas semelhantes.

Secções longitudinais dos resultados do MCMQ relativos à salinidade encontram-se na Figura 6. A cor azul indica zonas menos salinas, ou seja a presença da pluma, e a cor vermelha indica zonas mais salinas. Estes dados permitem identificar, de forma não ambígua, a presença da pluma e observar a evolução da sua dispersão à superfície ao longo da direcção da corrente. A pluma é identificada como uma região de salinidade inferior à das águas circundantes à mesma profundidade, ascendendo até à superfície devido à fraca estratificação e correntes de baixa intensidade. É também possível observar os limites laterais da pluma uma vez que a largura do campo de fluido é um pouco inferior à largura da área monitorizada, tal como se pretendia.

A maior diferença registada nos valores da salinidade à superfície entre a zona da pluma e a zona exterior começou por ser 0.4 psu nos primeiros ~40 m, diminuindo para cerca de 0.15 psu nos 40 m seguintes, sendo de 0.1 psu a uma distância ~100 m e praticamente nula a cerca de 120 m do difusor. Washburn *et al.* (1992) e Petrenko (1998) observaram diferenças da mesma ordem de grandeza. Os perfis verticais de salinidade obtidos por Petrenko *et al.* (1998) no centro e sobre a ponta Oeste do difusor, onde foram observadas as concentrações mais elevadas da pluma, indicam diferenças na ordem dos 0.2 psu. As maiores diferenças de salinidade observadas por Washburn *et al.* (1992) foram de cerca de 0.1 psu.

Estes resultados permitem detectar a presença da pluma desde a superfície (a profundidades mínimas de ~1.5 m) até aos 8 m de profundidade, numa distância até cerca de 80 m

do difusor, diminuindo de largura. É visível uma diferença de salinidade acentuada nos limites laterais da pluma, estando a zona de dispersão perfeitamente centrada na área monitorizada.

A pluma exibe uma estrutura consideravelmente mais complexa que a forma compacta da figura clássica da pluma boiante sugere, mas não tão desconexa como em outros estudos anteriores. Este facto deve-se talvez a uma melhoria significativa da resolução espaço-temporal dos dados recolhidos, proporcionada pelo VSA.

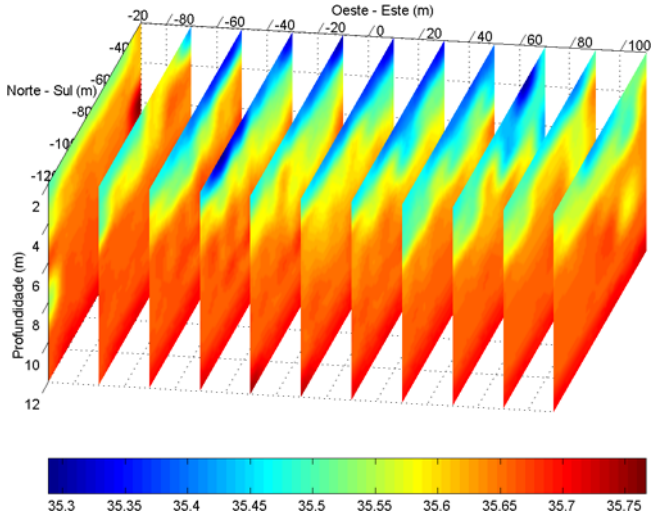


Figura 6. Secções longitudinais dos resultados de salinidade (psu).

Estimação da Diluição da Pluma

A diluição da pluma foi estimada empiricamente representando os dados de temperatura e salinidade num diagrama T-S, com linhas de mistura inicial entre as características T-S do efluente e as das águas ambientais ao nível da descarga (ver Figura 7). Os detalhes deste método podem ser encontrados em Washburn *et al.* (1992), Petrenko *et al.* (1998) e Ramos (2005).

Após a saída do efluente (com temperatura T_e e salinidade S_e) através dos orifícios do difusor inicia-se o processo da sua mistura com as águas do meio receptor (com temperatura T_a e salinidade S_a) à profundidade da descarga. Num diagrama T-S, a temperatura e a salinidade da massa de água da mistura, respectivamente T_m e S_m , correspondem a um ponto na linha de mistura que une os pontos T-S do efluente e do meio.

As características T_m e S_m variam de acordo com o factor de diluição entre o efluente e as águas do meio receptor. Para uma dada diluição S , T_m e S_m são respectivamente iguais a (Fischer *et al.*, 1979):

$$\begin{cases} T_m = T_a + \frac{1}{S}(T_e - T_a) \\ S_m = S_a + \frac{1}{S}(S_e - S_a) \end{cases} \quad [1]$$

Uma vez que a densidade do efluente é inferior à densidade das águas do meio receptor, o processo de mistura inicial, extremamente vigoroso, ocorre durante a ascensão da pluma sobre o difusor (Roberts *et al.*, 1989). As medidas obtidas indicam que parte desta mistura inicial com meio ocorre entre os 15 e os 11 m de profundidade. Assim, para a representação desta mistura inicial num diagrama T-S

foram considerados os valores da temperatura e da salinidade nestas duas profundidades, caracterizando-se assim a variabilidade das condições do meio receptor.

A Figura 7 mostra os dados de temperatura e salinidade da secção 1 representados num diagrama T-S. As medidas obtidas à mesma profundidade estão representadas com a mesma cor: vermelho, azul e preto correspondem, respectivamente a medidas obtidas aos 12, 10 e 8 m de profundidade.

Simultaneamente, foram também representadas linhas de mistura inicial entre o ponto TS correspondente ao efluente (não visível) $T_e = 35^\circ\text{C}$ e $S_e = 2$ psu, e os dois pontos TS correspondentes ao meio receptor (T_a e S_a) relativos às profundidades 15 e 11 m.

As linhas, que unem os pontos TS dessas duas linhas de mistura inicial com a mesma diluição, delimitam zonas de diluição inicial. Os pontos TS (T_m e S_m) correspondentes aos factores de diluição 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 70, 80, 90, 100, 120, 150, 200, 300 e 400 estão indicados.

Assim, a diluição é estimada empiricamente baseada no facto de que os pontos TS correspondentes à pluma são membros desta mistura entre o ponto TS do efluente e os pontos TS do meio receptor. Os pontos TS, correspondentes à pluma, com menor diluição, que se encontram numa zona de mistura inicial estabelecem a diluição inicial da mesma. Os pontos TS pertencentes à pluma, localizados fora das zonas de mistura inicial, correspondem a pontos da mistura que já iniciaram a sua difusão com águas do meio receptor acima dos 11 m de profundidade. De acordo com estes resultados, a diluição da pluma foi de, pelo menos, 30:1. Este valor é provavelmente uma estimativa muito pessimista da diluição, uma vez que, como se observa pelos resultados de mapeamento espacial, o processo de diluição inicial na realidade continuou a ocorrer até à superfície. No entanto, com este método não é possível determinar esta diluição posterior.

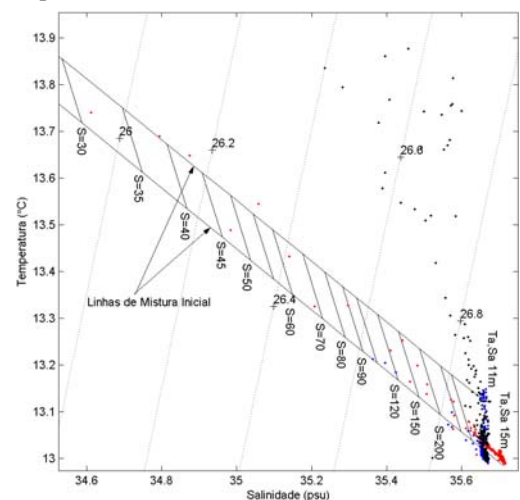


Figura 7. Diagrama T-S dos dados da secção 1.

5. CONCLUSÕES

Em Portugal existe já um número considerável de exutores submarinos a descarregar águas residuais urbanas e industriais em ambiente costeiro. Com o aumento do

caudal descarregado, devido à conclusão gradual das redes de saneamento em alta, este tipo de estruturas ganha um papel preponderante na protecção do meio ambiente e da saúde pública. Os veículos submarinos autónomos constituem uma tecnologia de vanguarda para monitorização ambiental e recolha de dados oceanográficos. Com os avanços tecnológicos a vários níveis dos últimos anos estes veículos tornaram-se economicamente competitivos e operacionalmente mais fiáveis tornando-se viável a sua utilização também para fins comerciais.

Novas técnicas laboratoriais não intrusivas estão sendo usadas com sucesso para medir simultaneamente a concentração e velocidade de traçadores, sendo já possível obter instantaneamente estes dados para todo o campo de fluído. A partir destas medidas é possível extrair informação estatística detalhada acerca da intermitência da pluma, funções de densidade de probabilidade e correlações espaciais. O desafio está agora na utilização dessa informação não só para melhorar os modelos matemáticos de previsão do processo hidrodinâmico da mistura mas também para prever a variabilidade deste fenómeno in situ sob várias escalas de comprimento e de tempo. Para o efeito poderão ser exploradas novas técnicas de recolha de dados adaptativas particularmente interessantes para este tipo de fenómenos. Será também interessante num futuro próximo testar o potencial de medidas de fluorescência sob determinados comprimentos de onda como a possibilidade de observação de características únicas do efluente proveniente de águas residuais (Petrenko *et al.*, 1997). Espera-se assim que o desenvolvimento e a aplicação de instrumentação avançada de observação permita num curto prazo melhorar o conhecimento e a modelização do processo de mistura sob condições oceanográficas reais.

REFERÊNCIAS

- Alt, C.V., Allen, B., Austin, T., Stokey, R., (1994). *Remote Environmental Measuring Units*, Proceedings of Autonomous Underwater Vehicles '94 Conference.
- Carvalho, J.L.B., Roberts, P.J.W., Roldão, J., (2002). *Field Observations of the Ipanema Beach Outfall*, Journal of Hydraulic Engineering 128 (2), 151-160.
- Faisst, W.K., McDonald, R.M., Noon, T., Marsh, G., (1990). *Iona Outfall, Plume Characterization Study*, Proceedings 1990 National Conference on Hydraulic Engineering, ASCE, July 30 - August 3.
- Fischer, H.B., List, J.E., Koh, R.C.Y., Imberger, J., Brooks, N.H., (1979). *Mixing in Inland and Coastal Waters*, Academic Press.
- Fletcher, B., (2001). *Chemical Plume Mapping with an Autonomous Underwater Vehicle*, Proceedings of MTS/IEEE International Conference Oceans 2001, Biloxi, Hawaii, USA, November 5-8, 2001, pp. 508-512.
- Jones, B.H., Barnett, A., Robertson, G.L., (2001). *Towed Mapping of the Effluent Plume from a Coastal Ocean Outfall*, Proceedings of MTS/IEEE International Conference Oceans 2001, MTS 0-933957-29-7, Biloxi, Hawaii, USA, November 5-8, 2001, pp. 1985-1989.
- Matos, A., Cruz, N., Pereira, F.L., (2003). *Post Mission Trajectory Smoothing for the Isurus AUV*, Proceedings of Oceans 2003 Marine Technology and Ocean Science Conference, September 2003.
- Millero, F.J., Chen, C.T., Bradshaw, A., Schleicher K., (1980). *A New High Pressure Equation of State for Seawater*, Deep-Sea Research 27A, 255-264.
- Petrenko, A.A., Jones, B.H., Dickey, T.D., LeHaitre, M., Moore, C., (1997). *Effects of a Sewage Plume on the Biology, Optical Characteristics, and Particle Size Distributions of Coastal Waters*, Journal of Geophysical Research 102 (C11), 25061-25071.
- Petrenko, A.A., Jones, B.H., Dickey, T.D., (1998). *Shape and Initial Dilution of Sand Island, Hawaii Sewage Plume*, Journal of Hydraulic Engineering 124 (6), 565-571.
- Petrenko, A.A., Jones, B.H., Dickey, T.D., Hamilton, P., (2000). *Internal Tide Effects on a Sewage Plume at Sand Island, Hawaii*, Continental Shelf Research (20), 1-13.
- Ramos, P., Neves, M.V., Cruz, N., Pereira, F.L., (2000a). *Outfall Monitoring Using Autonomous Underwater Vehicles*, Proceedings of the International Conference on Marine Waste Water Discharges, Génova, Italy, November 28 - December 1, pp. 321-331.
- Ramos, P., Cruz, N., Matos, A., Neves, M.V., Pereira, F.L., (2000b). *Prediction Studies for an AUV Monitoring Mission Plan*, Fifth International Conference on the Mediterranean Coastal Environment, Hamammet, Tunisia, October 2001, pp. 1299-1310.
- Ramos, P., Neves, M.V., Pereira, F.L., (2002). *Using Near Field Model Predictions to Detect and Map an Outfall Sewage Plume with an AUV*, Proceedings of MTS/IEEE International Conference Oceans 2002, Biloxi, Mississippi, USA, October, 2002.
- Ramos, P., (2005). *Advanced Mathematical Modeling for Outfall Plume Tracking and Management using Autonomous Underwater Vehicles based Systems*, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, PhD Thesis, Portugal, March, 2005.
- Roberts, P.J.W., Snyder, W., Baumgartner, D., (1989). *Ocean Outfalls*, Journal of Hydraulic Engineering 115 (1), 1-70.
- Roberts, P.J.W., (1999). *Modeling Mamala Bay Outfall Plumes. I: Near Field*, Journal of Hydraulic Engineering 125 (6), 564-573.
- Roberts, P.J.W., Hunt, C.D., Mickelson, M.J., (2002). *Field and Model Studies of the Boston Outfall*, Proceedings of the 2nd International Conference on Marine Waste Water Discharges, Istanbul, Turkey, September 16-21.
- Robinson, A.R., Bellingham, J.G., Chryssostomidis, C., Dickey, T.D., Levine, E., Petrikalakis, N., Porter, D.L., Rothschild, B.J., Schmidt, H., Sherman, K., Holliday, D.V., Atwood, D.K., (1999). *Real-Time Forecasting of the Multidisciplinary Coastal Ocean with the Littoral Ocean Observing and Predicting System (LOOPS)*, Proceedings of the Third Conference on Coastal Atmospheric and

Oceanic Prediction Processes, American Meteorological Society, New Orleans, LA.

- Washburn, L., Jones, B.H., Bratkovich, A., Dickey, T.D., Chen, M., (1992). *Mixing, Dispersion, and Resuspension in Vicinity of Ocean Wastewater Plume*, Journal of Hydraulic Engineering 118 (1), 38-58.
- Wu, Y., Washburn, L., Jones, B.H., (1994). *Buoyant Plume Dispersion in a Coastal Environment: Evolving Plume Structure and Dynamics*, Continental Shelf Research 14 (9), 1001-1023.
- Yu, X., Dickey, T.D., Bellingham, J.G., Manov, D., Streitlien, K., (1994). *The Application of Autonomous Underwater Vehicles for Interdisciplinary Measurements in Massachusetts and Cape Cod Bayes*, Continental Shelf Research 22 (15), 2225-2245.
- Zhang, X., Liu, X., Song, K., Lu, M., (2001). *Least-Squares Collocation Meshless Method*, Int. Journal for Numerical Methods in Engineering 51, 1089-1100.