

MONITORIZAÇÃO DE DESCARGAS DE ÁGUAS RESIDUAIS NO MAR ATRAVÉS DE VEÍCULOS SUBMARINOS AUTÓNOMOS (VSAs)

Patrícia Ramos

Instituto Superior de Contabilidade e Administração do Porto
Rua Jaime Lopes Amorim, s/n, 4465-004, S. Mamede Infesta, Portugal
patricia@fe.up.pt

Mário Valente Neves

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Rua Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, Portugal

Resumo: As águas residuais urbanas e industriais são frequentemente descarregadas em zonas costeiras através de exdutores submarinos, que promovem a sua diluição no meio receptor, no sentido de reduzir o impacto ambiental. A previsão desse impacto com elevada precisão é ainda difícil, devido à complexidade das acções físicas, químicas, bacteriológicas e hidrodinâmicas intervenientes, pouco conhecidas. Nos últimos anos, vários esforços têm sido levados a cabo no sentido de melhorar as formas de monitorização do efluente descarregado. As técnicas tradicionais de recolha de dados são habitualmente dispendiosas e não permitem uma cobertura satisfatória da dispersão da pluma. Os veículos submarinos autónomos (VSAs) têm sido usados com elevado sucesso neste tipo de monitorização. Pela sua flexibilidade e eficiência no processo de recolha de dados constituem uma tecnologia de vanguarda com enorme potencial para monitorização de rotina.

Neste artigo começamos por descrever a composição habitual das águas residuais fazendo uma análise das possíveis consequências da sua descarga no mar. De seguida apresentam-se modelos matemáticos para a previsão do comportamento dos escoamentos, baseados na teoria sobre jactos e plumas. Esses modelos, para além do seu valor intrínseco, tornam-se um auxiliar precioso para o planeamento de acções de monitorização, ao permitirem uma estimativa prévia da localização e dimensões da pluma. Descrevem-se depois as técnicas tradicionais de monitorização e o VSA utilizado numa campanha de monitorização ao exutor submarino de S. Jacinto (Aveiro) realizada em Julho de 2002. Após a descrição das condições ambientais típicas deste exutor submarino, são apresentadas com detalhe as várias etapas levadas a cabo nessa missão de monitorização, mostrando-se as aplicações de software desenvolvidas para o efeito. Finalmente termina-se mostrando os resultados obtidos relativos ao mapeamento da dispersão da pluma e sua diluição.

DESCARGAS DE ÁGUAS RESIDUAIS NO MAR

Frequentemente, as águas residuais de povoações do litoral são descarregadas no mar através de exdutores submarinos, isto é, condutas que as transportam até uma certa distância da costa e promovem a sua dispersão na massa oceânica, em geral através de uma série de pequenos orifícios, que constituem o difusor (Figura 1).

As águas residuais podem conter substâncias capazes de deteriorar a qualidade do meio receptor, nas quais se incluem, por exemplo (Neves e

Neves, 1992):

- a) material sólido, que pode sedimentar ou, nalguns casos, flutuar;
- b) óleos e gorduras susceptíveis de flutuação;
- c) matéria orgânica consumidora do oxigénio do meio receptor;
- d) nutrientes que podem estimular o crescimento de plantas e levar à eutrofização;
- e) microorganismos que podem, eventualmente, dar origem a doenças.

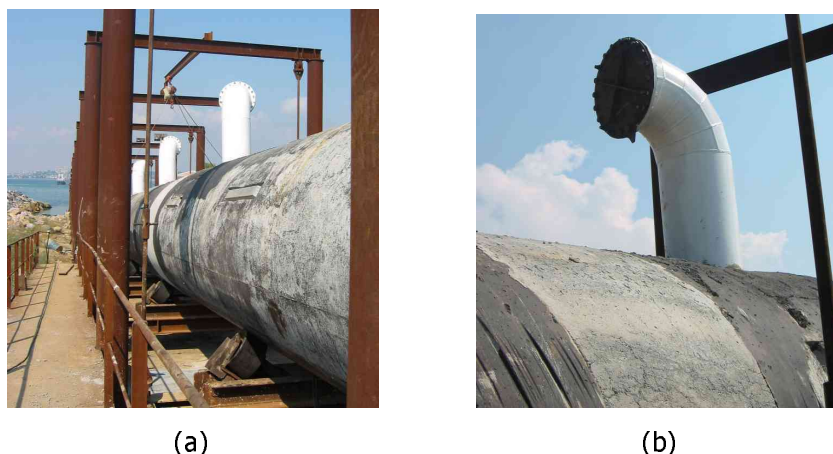


Figura 1. (a) Difusor de um exutor submarino. (b) Pormenor do orifício (cortesia da Istanbul Water and Sewerage Administration)



Figura 2. Jacto descarregado através de um orifício do exutor submarino de S. Jacinto (cortesia da SIMRIA, www.simria.pt)

- f) Nalguns casos, substâncias tóxicas que podem envenenar peixes e mariscos (este risco está mais ligado às águas industriais).

Os indicadores de poluição mais vulgarmente utilizados são o teor em sólidos suspensos (SS), a carência bioquímica de oxigénio (CBO) e o teor em coliformes fecais (CF) - DL 152/97 (1997). A eficiência de um exutor submarino reside na diluição que for capaz de assegurar, isto é, na redução da concentração dos poluentes a níveis suficientemente baixos para que possam ser tolerados.

Note-se que um exutor submarino é geralmente antecedido por um tratamento das águas residuais. Nas primeiras realizações, há umas dezenas de anos, o tratamento era geralmente rudimentar, mas actualmente exige-se uma solução compatível com a sensibilidade

do meio receptor, que frequentemente conduz a um tratamento de nível secundário (remoção de 90% SS e 70 - 90% CBO). Como ordem de grandeza pode dizer-se que o comprimento dos exutores submarinos se situa tipicamente entre 2000 e 3000 metros, embora haja exemplos de outros muito mais extensos.

A desejada diluição da carga poluente ocorre no “campo próximo” (aqui designada por D1) e no “campo remoto” (designada por D2).

Diluição no campo próximo

No campo próximo os jactos descarregados (Figura 2) dão origem a turbilhões que arrastam a água do mar para o interior do escoamento, aumentando o caudal e, conseqüentemente, reduzindo a concentração dos poluentes.

Esses jactos são fundamentalmente caracterizados pelo fluxo da quantidade de movimento

e também por uma menor densidade relativamente à água do mar (água doce descarregada em água salgada), responsável pelo chamado fluxo de défice de peso (Fischer, 1979). O fluxo da quantidade de movimento é a grandeza fundamental dos jactos e o fluxo de défice de peso é a grandeza fundamental das plumas, daí que o escoamento processado nas descargas dos exdutores submarinos se possa designar por “jacto misto”, ou também “pluma forçada”. Próximo da origem o escoamento é comandado por forças de inércia, isto é, assemelha-se a um jacto puro. Porém, estas vão-se rapidamente dissipando no processo de arrastamento do fluido circundante, pelo que as forças densimétricas acabam por se tornar dominantes, aproximando o escoamento de uma pluma pura. Isto é, perto da origem o escoamento comporta-se como um jacto, enquanto longe da origem se comporta como uma pluma. A este cenário relativamente simples há que acrescentar o efeito das correntes oceânicas e uma eventual estratificação densimétrica das águas do mar. As primeiras ampliam a diluição no campo próximo. Por sua vez, a estratificação pode chegar a impedir a ascensão da pluma até à superfície, situação que nuns casos é desejada, mas noutros não. Conhecem-se casos (por exemplo, no Hawai e no Brasil) em que o projecto foi condicionado pelo requisito de os esgotos não atingirem a superfície, por razões de natureza estética. Contudo, na maioria dos casos parece preferível que o esgoto não fique submerso, para limitação dos efeitos sobre os ecossistemas.

As características dos escoamentos dependem da configuração do difusor, em particular do seu comprimento, profundidade, espaçamento entre orifícios e diâmetro destes. Quando os orifícios estão muito espaçados os jactos descarregados não interagem entre si, comportando-se como jactos individuais. Quando estão pouco espaçados, geralmente interferem, unindo-se e comportando-se como uma descarga através de uma fenda. Os fluxos cinemáticos de massa (caudal), quantidade de movimento e défice de peso, para as situações de “jacto individual” e “jacto de fenda” são respectivamente (Fischer, 1979; Tian 2004a):

$$\begin{aligned} Q_i &= \frac{\pi}{4} d^2 u_i, & M &= u_i Q_i, & B &= g'_0 Q_i \\ q &= \frac{Q_T}{L}, & m &= u_i q, & b &= g'_0 q \end{aligned} \quad (1)$$

onde,

$$Q_i = \frac{Q_T}{n}, \quad g'_0 = g \left(\frac{\rho_a - \rho_0}{\rho_0} \right) \quad (2)$$

Nestas expressões, Q_T é o caudal total descarregado, n o número de orifícios, L o comprimento do difusor, d o diâmetro dos orifícios, u_i a velocidade de saída do jacto, g'_0 a aceleração devida às diferenças densimétricas, g a aceleração da gravidade, ρ_a a massa volúmica da água do mar à profundidade da descarga e ρ_0 a massa volúmica do esgoto. A estratificação densimétrica das águas do mar tende a inibir a movimentação vertical da pluma e, consequentemente, reduzir a altura de ascensão e correspondente diluição. Habitualmente é caracterizada pela frequência de flutuação N , também designada por frequência de Brunt-Vaisala (Daviero, 2006; Tian, 2006):

$$N = \sqrt{-\frac{g}{\rho_0} \frac{d\rho_a}{dz}} \quad (3)$$

As correntes oceânicas intensificam o processo de mistura, afectando de forma significativa a diluição, de acordo com a sua intensidade e orientação relativamente ao difusor. O efeito dinâmico das correntes marítimas é habitualmente caracterizado pelo parâmetro F (Roberts, 1979; Tian 2004b; Tian, 2006):

$$F = \frac{u^3}{b} \quad (4)$$

onde u é a velocidade da corrente. Quando $F < 1$ o escoamento é dominado pelos efeitos densimétricos e quando $F > 1$ é dominado pelas correntes marítimas.

O final do campo próximo ocorre quando a turbulência induzida pela descarga se torna pouco significativa, terminando a ascensão da pluma na coluna de água e iniciando-se o seu espalhamento lateral. As características com mais interesse da pluma estabilizada no final do campo próximo são (ver Figura 3): a diluição mínima S_n , a extensão do campo próximo x_n , a espessura da pluma h_n , a altura de ascensão ao nível da diluição mínima z_n , e a altura máxima de ascensão z_m (Roberts, 1996). Através da Análise Dimensional pode definir-se, para cada uma destas características, uma relação adimensional onde intervêm os elementos que afectam a dinâmica da mistura (Tian, 2006):

$$\frac{S_n q N}{b^{2/3}}, \frac{x_n}{l_b}, \frac{h_n}{l_b}, \frac{z_n}{l_b}, \frac{z_m}{l_b} = f \left(\frac{s}{l_b}, F \right) \quad (5)$$

onde $l_b = \frac{b^{2/3}}{N}$ é uma escala de comprimentos associada aos efeitos densimétricos e à estratificação.

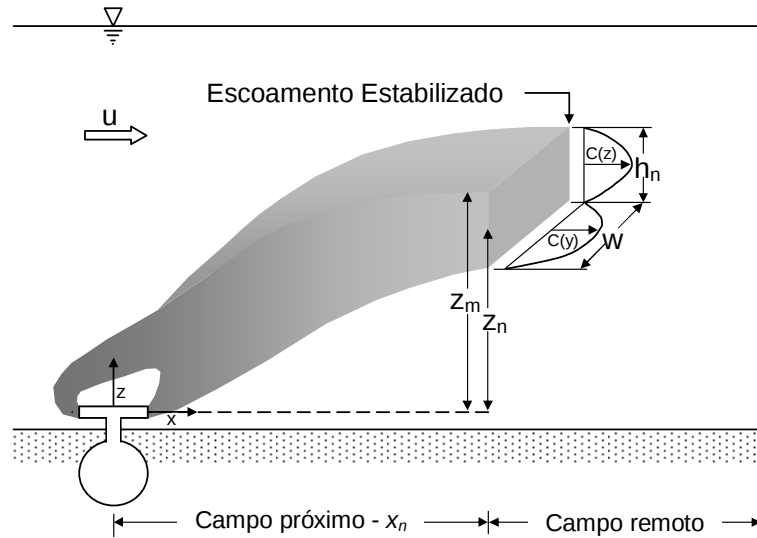


Figura 3. Características do escoamento no final do campo próximo (adaptado de Roberts, 1996)

Para o “jacto de fenda”, caso em que os orifícios estão próximos, ou seja $s/l_b < 1$, as características da pluma são independentes do espaçamento entre os orifícios e apenas função de F . Através de experiências de laboratório Roberts (1989) propôs um conjunto de soluções para o caso de correntes fortes ($F > 1$) e perpendiculares ao difusor. Daviero (1998) e Tian (2006), refizeram essas experiências usando equipamento mais avançado (ver detalhes em Daviero (2001)) tendo obtido as seguintes expressões, para $s/l_b < 2.0$:

$$\frac{S_n q N}{b^{2/3}} = 1.23 F^{1/6}, \quad \frac{x_n}{l_b} = 8.0 F^{1/3} \quad (6)$$

$$\frac{z_n}{l_b} = 1.4 F^{-1/6}, \quad \frac{z_m}{l_b} = 2.4 F^{-1/6}$$

Quando as correntes são fracas (ou seja,) as características da pluma são independentes de F . Tian (2006) obteve as seguintes expressões para este regime quase estacionário:

$$\frac{S_n q N}{b^{2/3}} = 0.86, \quad \frac{x_n}{l_b} = 2.3 \quad (7)$$

$$\frac{z_n}{l_b} = 1.7, \quad \frac{z_m}{l_b} = 3.2$$

Para “jactos individuais”, em que os orifícios estão muito afastados, ou seja $s/l_b > 1$, Wright (1984) e Daviero (1998) obtiveram as seguintes expressões para correntes fortes e perpendicu-

res ao difusor:

$$\frac{S_n Q_i N^{4/3}}{u^{1/3} B^{2/3}} = 1.3 (s/l_b \geq 6)$$

$$\frac{x_n}{l_s} = 12.0 \frac{l_a}{l_s} \Leftrightarrow x_n = 12.0 \frac{u}{N} (s/l_b > 2.0) \quad (8)$$

$$\frac{z_n}{l_b} = 1.9 \left(\frac{l_a}{l_s} \right)^{2/3} (s/l_b > 4.0) \quad (9)$$

$$\frac{z_m}{l_b} = 2.9 \left(\frac{l_a}{l_s} \right)^{2/3} (s/l_b > 4.0)$$

onde $l_s = \frac{B}{u^3}$ e $l_a = \frac{u}{N}$ são escalas de comprimentos associadas às acções em presença.

Diluição no campo remoto

A alguma distância da origem, comparável à profundidade da descarga, e por efeito da mistura, quer as forças de inércia quer as forças densimétricas vão perdendo significado, passando a diluição D2 a ser comandada pela dispersão turbulenta que ocorre no processo de transporte. Em resumo, para os poluentes conservativos, a diluição total obtém-se pelo produto $D1 \times D2$.

Porém, tratando-se de poluentes não conservativos, como os coliformes, por exemplo, haverá que contar com a sua inactivação ao longo do tempo (provocada pela salinidade, luz solar, temperatura, etc.), o que equivale a um terceiro factor de “diluição”, agora designada por D3. Consequentemente, para os poluentes não-conservativos a diluição será o produto $D1 \times D2 \times D3$.

O que se acabou de referir constitui, naturalmente, uma abordagem simplificada do problema, visto que os processos físicos, químicos e biológicos envolvidos, dinâmicos e complexos, dificultam bastante a sua modelação teórica. Uma correcta representação da complexidade oceanográfica está ainda para além da capacidade dos modelos existentes (Petrenko, 1998; Ramos 2005). 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, que não são considerados.

MONITORIZAÇÃO DAS DESCARGAS

Grandes esforços têm sido recentemente levados a cabo no sentido de melhorar as formas de monitorização das descargas de efluentes provenientes dos exutores submarinos (Faisst, 1990; Washburn, 1992; Wu, 1994; Petrenko, 1997; Petrenko, 1998; Petrenko, 2000; Jones, 2001; Carvalho, 2002; Roberts, 2002). No entanto, as várias metodologias usadas, com diferentes resoluções espaço-temporais, não permitiram ainda caracterizar de forma adequada a diluição e a extensão espacial das plumas, não avaliando portanto fiavelmente os reais impactes das descargas. As dificuldades são essencialmente devidas aos elevados custos envolvidos, grande variabilidade das condições oceanográficas, nomeadamente a estratificação da densidade e a intensidade e direcção das correntes, e as grandes áreas a monitorizar. As técnicas tradicionais para observação subaquática são dispendiosas e não oferecem uma cobertura satisfatória da dispersão do efluente, apesar dos requisitos de acompanhamento ambiental 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 técnicas de monitorização das descargas de exutores submarinos: (i) recolhendo amostras, (ii) usando traçadores artificiais ou (iii) obtendo dados das propriedades físicas e bio-ópticas da pluma.

A recolha de amostras e pós-análise laboratorial é a técnica de monitorização tradicional. 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. (DL 152/97, 1997 - Directiva 91/271/CEE, 1991; DL 74/90, DL 236/98 - Directiva 76/160/CEE, 1976). Em contraste com as técnicas de observação in situ, esta forma pode assinalar directamente potenciais indicadores de risco, mas para além de não permitir uma detecção em tempo real, é de baixa resolução espacial, uma vez que está limitada a um pequeno conjunto de pontos de observação. Dependendo da localização pré-definida destes pontos em relação à pluma no instante da observação, pode eventualmente não se capturar ou subestimar características da mesma.

Quando uma fonte de poluição, tal como as plumas de efluentes, está sob suspeita e algumas dúvidas ambientais têm de ser esclarecidas, utilizam-se habitualmente traçadores artificiais, onde se incluem substâncias radioactivas, substâncias fluorescentes ou partículas, injectados no efluente na ETAR, ou no meio ambiente ao nível dos difusores (Faisst, 1990; Carvalho, 2002; Roberts, 2002). Apesar de ser uma técnica bastante eficaz, uma vez que permite a detecção do traçador com exactidão até níveis muito baixos, sendo possível a estimação da diluição a consideráveis distâncias, não é prática para monitorização de rotina. Estes estudos envolvem normalmente elevados custos, uma logística complexa e podem provocar impactes negativos no meio.

A monitorização das plumas de efluentes pode também ser feita através da detecção de componentes presentes na descarga. Estudos de campo já realizados utilizaram medidas de temperatura, salinidade, turvação e clorofila para caracterizar e determinar a extensão espacial das plumas (Washburn, 1992; Wu, 1994; Petrenko, 1998; Jones, 2001). 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, muitas vezes, 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, 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.

Tanto o conhecimento da dinâmica da descarga sob o espectro das condições ocea-

nográficas existentes (Carvalho, 2002; Roberts, 1999; Ramos, 2005), como a compreensão dos processos de mistura, requerem observações não ambíguas de elevada resolução espaço-temporal. Devido à simples logística, reduzidos custos por operação, boa cobertura espacial, redução dos efeitos de desfasamento espaciais e temporais e capacidade de recolha de dados de forma adaptativa, os veículos submarinos autónomos (VSA) constituem uma tecnologia particularmente poderosa para a detecção e mapeamento de plumas de efluentes provenientes de exutores submarinos (Ramos, 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 caracterizarem o meio e se localizarem. Graças aos desenvolvimentos ao nível da operacionalidade e fiabilidade, o seu desempenho tem vindo gradualmente a melhorar, tendo já sido realizadas várias missões científicas e militares que forneceram dados de grande qualidade (Yu, 1994; Robinson, 1999).

VEÍCULO SUBMARINO AUTÓNOMO UTILIZADO

A Figura 4 mostra o VSA da classe REMUS (Alt, 1994) que foi utilizado numa missão de monitorização ao exutor submarino de S. Jacinto, realizada em Julho de 2002. 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 kg, 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 alberga o sistema de propulsão.

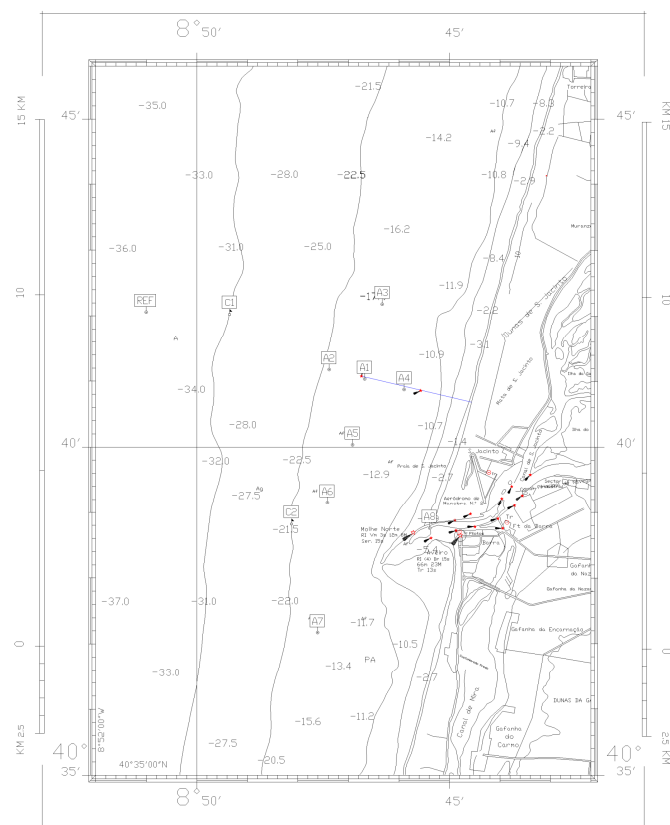
Durante as missões o veículo desloca-se sem qualquer ligação física com o exterior e a energia é fornecida por um conjunto de baterias recarregáveis. A duração máxima das missões é de cerca de 10-12 horas à velocidade nominal de 2-3 nós, ou seja, é possível percorrer 30 milhas marítimas (cerca de 56 km). 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 comprimento pode ser aumentado para permitir um acréscimo de carga útil. Para operar de forma autónoma o VSA possui um computador de bordo que controla a execução do conjunto de manobras que constituem a missão. Durante a sua execução o veículo necessita de determinar em tempo real a sua posição, a qual é obtida através de sinais acústicos entre o veículo e um conjunto de faróis colocados na área de operação.

Uma operação típica do VSA engloba as seguintes etapas:

1. *Preparação da missão.* Consiste no planeamento da trajectória a descrever pelo VSA e na colocação na área de operação dos faróis de navegação.
2. *Execução da missão.* Durante esta etapa o veículo executa de forma autónoma a sequência de movimentos definida na missão. O utilizador limita-se a acompanhar esta execução, apenas intervindo caso ocorra algum acontecimento inesperado.
3. *Recolha do veículo.* Após completar a missão, o veículo é recolhido e são descarregados os dados recolhidos. São também recuperados os faróis de navegação.



Figura 4. Veículo Submarino Autónomo



4. *Processamento de dados.* Os dados sobre as características do meio por onde o veículo operou são tratados de forma automática, com vista á obtenção das informações pretendidas.

Para a missão em causa o VSA transportou um altímetro, que forneceu medições da distância ao fundo, e um CTD (conductivity, temperature, depth) que proporcionou medições de condutividade, temperatura e pressão a uma frequência de 2.4 Hz. A partir destes dados é possível inferir os valores da salinidade e da densidade (Millero, 1980).

CONDIÇÕES AMBIENTAIS DO EXUTOR SUBMARINO

A Figura 5 mostra a localização do exutor submarino na costa oeste portuguesa, mais concretamente em S. Jacinto, zona próxima de Aveiro. O seu comprimento total, incluindo o difusor, é de 3378 m. Actualmente o difusor contém 20 orifícios abertos (dispostos alternadamente a 30 e a 150 – ângulo com o eixo horizontal) que se encontram na zona terminal da tubagem, numa extensão de 98 m e a uma profundidade

de cerca de 15 m. O caudal médio descarregado é de aproximadamente 0.8 m³/s, com uma grande percentagem de efluente industrial, cerca de 75%.

A estratificação da densidade da coluna de água desempenha um papel fundamental no comportamento da pluma. Uma forte estratificação bloqueia a sua ascensão, afectando consequentemente a diluição e a cota máxima atingida. Em águas costeiras a estratificação depende sobretudo das variações da temperatura e da salinidade. Após o arranque do funcionamento do exutor, numa perspectiva de avaliar a qualidade da água do mar nas zonas circundantes, foram elaboradas várias campanhas de recolha de dados usando a instrumentação de medição *in situ* habitual. A Figura 5 mostra a localização das estações oceanográficas na vizinhança do exutor, identificadas no mapa por uma letra e um número (por exemplo A1) havendo ainda uma estação de referência denotada por REF. A Figura 6 mostra os perfis de temperatura, salinidade e densidade na estação oceanográfica A3 em várias épocas do ano (aos perfis de cada época do ano foi associada a mesma

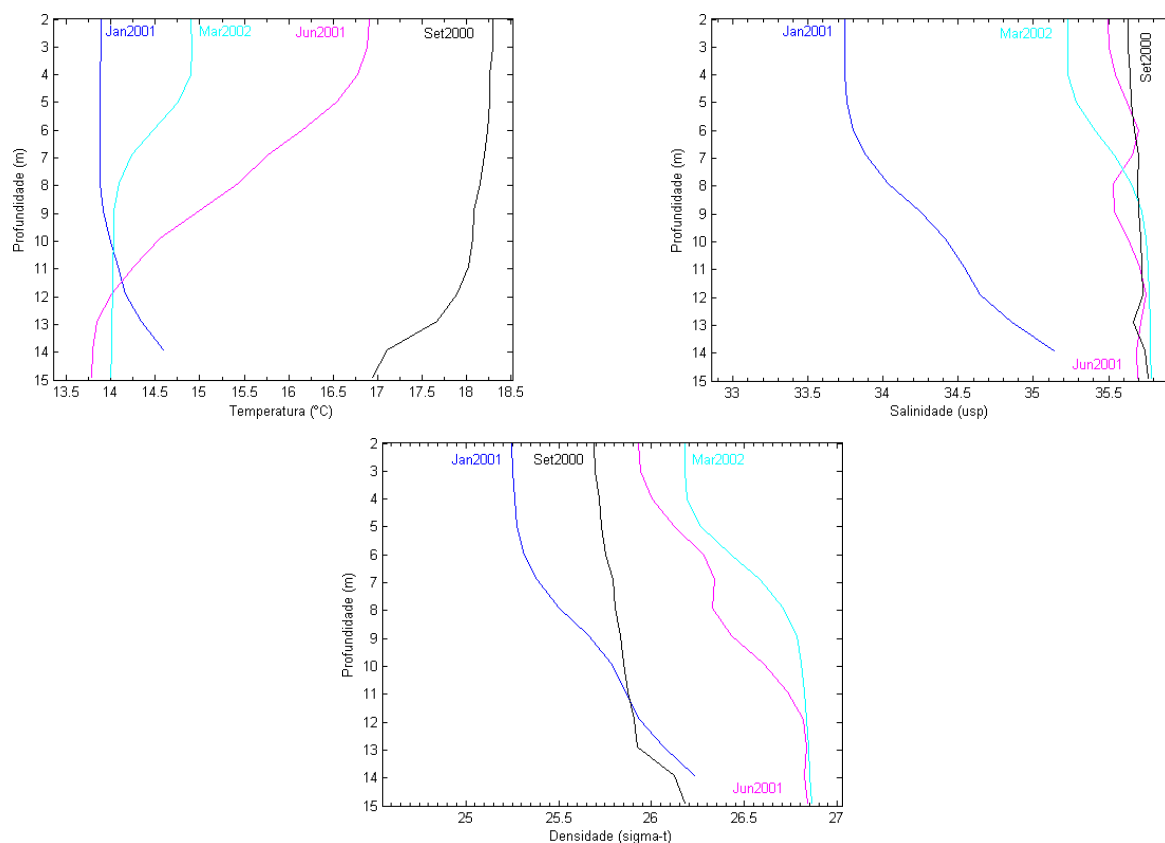


Figura 6. Perfis de temperatura, salinidade e densidade na estação A3 em várias épocas do ano

cor). Esta estação A3 encontra-se na mesma linha batimétrica do difusor, distanciada deste aproximadamente 2 km para Norte. Tal como a estação A5, que apresenta perfis semelhantes, A3 constitui uma boa referência para a caracterização das condições de estratificação do meio receptor.

De acordo com estes dados, em Janeiro e Junho a coluna de água encontra-se fortemente estratificada, sendo de $\sim 1.0 \sigma_t$ a diferença entre os valores da densidade na superfície e no fundo. Enquanto em Janeiro essa estratificação se deve sobretudo à influência da salinidade, que regista uma diferença significativa entre a superfície e o fundo (cerca de 1.4 psu), em Junho deve-se sobretudo à influência da temperatura, que apresenta uma variação de $\sim 3.1^\circ\text{C}$ ao longo da coluna de água. O perfil de temperatura em Janeiro apresenta muito pouca variabilidade, uma diferença total de cerca de 0.7°C , tal como o perfil de salinidade em Junho, cujas variações não excedem 0.2 psu. Em Março de 2002 a coluna de água apresenta-se não tão estratificada como em Janeiro e Junho, sendo de apenas $\sim 0.7 \sigma_t$ a diferença entre os valores da densidade na superfície e no fundo. Tal deve-se à menor variação quer da temperatura quer da

salinidade, cujas diferenças na coluna de água não excedem, respectivamente, $\sim 0.9^\circ\text{C}$ e ~ 0.6 psu. Em Setembro de 2000 a água apresenta-se pouco estratificada (a diferença entre os valores da densidade na superfície e no fundo é de $\sim 0.5 \sigma_t$) devido à pequena variação da temperatura e da salinidade, que registam diferenças entre a superfície e o fundo de $\sim 1.4^\circ\text{C}$ e ~ 0.1 psu.

Para além dos perfis CTD foram também obtidos dados das correntes utilizando correntómetros (cuja localização está referenciada na Figura 5 por C1 e C2), os quais estiveram fundeados aos ~ 27 m e ~ 17 m, respectivamente, entre Janeiro e Abril de 2001. A Figura 7 mostra a distribuição conjunta da intensidade e direcção das correntes medidas em C2.

Estas correntes influenciam directamente o comportamento da pluma, visto corresponderem às da profundidade da descarga. As direcções predominantes são paralelas à batimetria local, ou seja, perpendiculares à direcção do difusor. As direcções N e NNE ocorreram em 26.1% do tempo, enquanto que as direcções SSE e S foram obtidas em 20.9% do tempo. As correntes N e NNE atingiram as intensidades médias mais elevadas, respectivamente, 26.9 e 29.7 cm/s, com

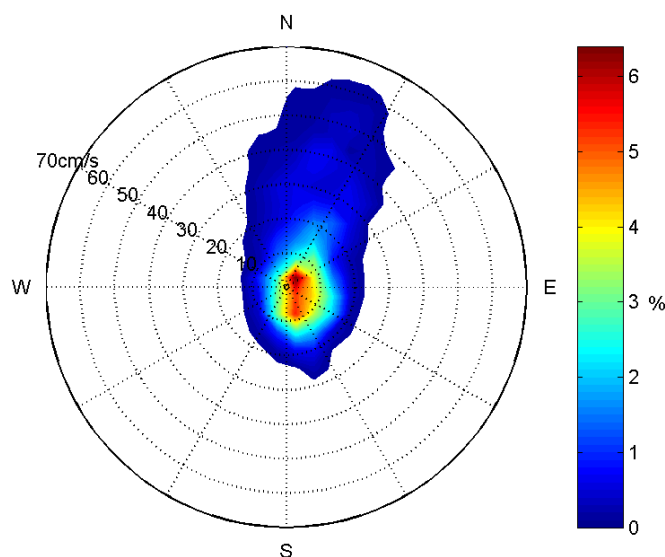


Figura 7. Diagrama polar da distribuição conjunta da intensidade e direcção das correntes em C2

um pico de 74.8 cm/s na direcção NNE. As correntes SSE e S mostraram-se mais fracas, com intensidades médias de, respectivamente, 13.3 e 13.2 cm/s. Cerca de 15.3% dos registos obtidos foram em direcção à costa, entre E e SE. Entre estas direcções a intensidade média das correntes variou entre 9.2 e 11.2 cm/s, atingindo um valor máximo de 39.1 cm/s.

SOFTWARE DE APOIO NA MONITORIZAÇÃO

A zona de diluição inicial da pluma é muito variável e dependente das condições de estratificação da coluna de água e intensidade e direcção das correntes (Ramos, 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, 1989), baseadas em observações da velocidade e direcção das correntes e estratificação da densidade, obtidas em tempo real, tendo sido possível especificar a missão do veículo (Ramos, 2002).

Uma aplicação integrada (ver Figura 8), desenvolvida para ser utilizada em campo, determina, de forma adaptativa e em tempo real, a trajectória mais eficiente da missão 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 8 mostra a determinação das especificações da missão de monitorização ao exutor de S. Jacinto, realizada em Julho de 2002, através da aplicação referida. Numa primeira fase foi ob-

tido 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 da secção média 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 CTD, a uma distância de 400 m da secção média do difusor, na direcção oposta à da corrente média (N 40° 41.1910' W 8° 46.7709' WGS84 datum). Uma vez carregados os dados do perfil 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 fornecidos pelo modelo, quer os requisitos de navegação do veículo, a aplicação determinou a trajectória da missão do VSA. Esta 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 da corrente média.

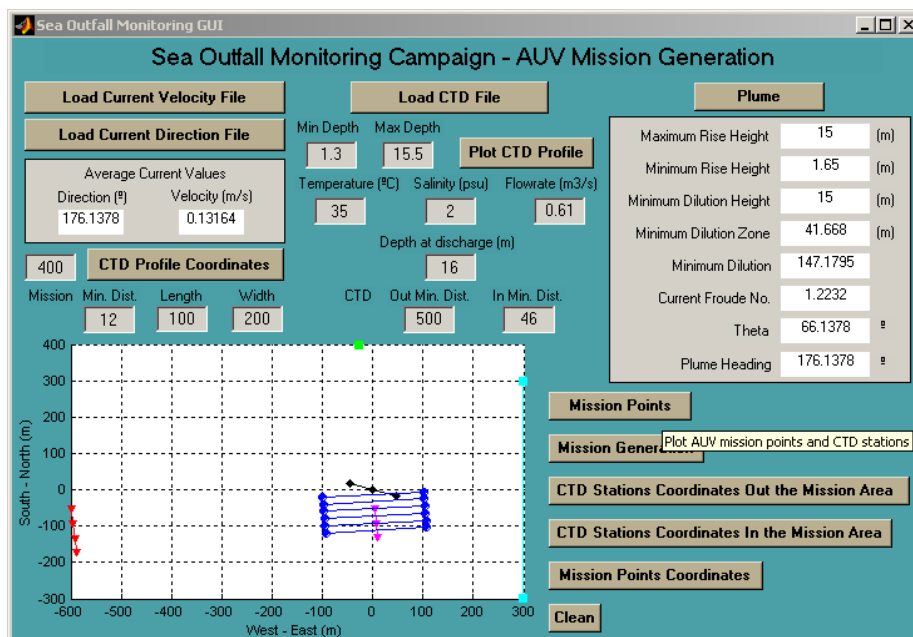


Figura 8. Software para monitorização de exdutores submarinos

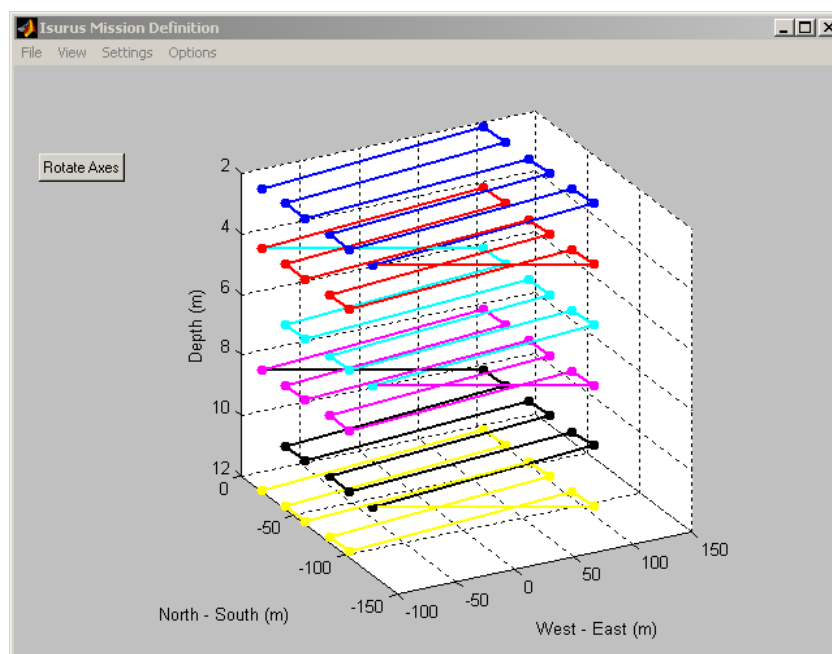


Figura 9. Software para especificação automática de missões de VSAs

Esta informação foi passada a uma segunda aplicação (Figura 9) que gerou de forma automática o ficheiro da missão. Os detalhes da mesma, 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 trajectória do veículo a 3D. A cor azul, vermelho, azul claro, rosa, preto e amarelo, estão indicadas respectivamente as zonas da trajectória a efectuar aos 2, 4, 6, 8, 10 e 12 m de profundidade.

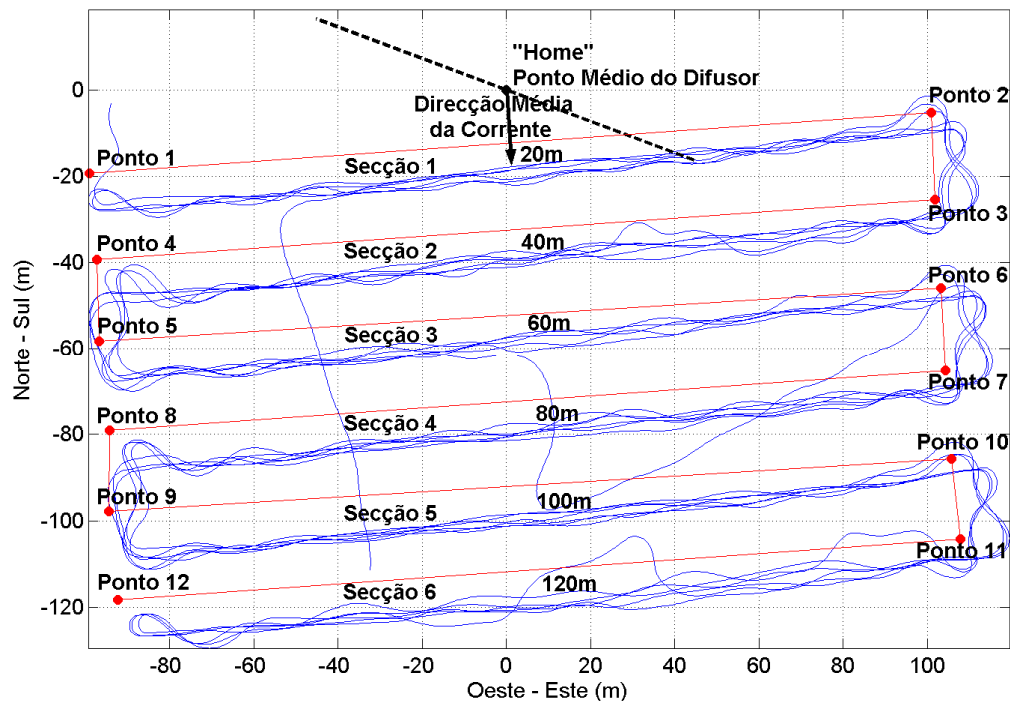


Figura 10. Trajectória estimada do VSA na zona da dispersão

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

RESULTADOS

A Figura 10 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, 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 10). Estes desvios deveram-se às fortes correntes que se fizeram sentir. Saliente-se a capacidade do sistema de navegação 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 CTD foram recolhidos a uma frequência de 24 Hz. Assim, a resolução horizontal foi de 0.4 m (definimos resolução horizontal como sendo a distância aproximada entre dois pontos consecutivos, medidos 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. (entende-se por resolução vertical 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 medições, 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.

O perfil ADCP, obtido entre os 1.55 m 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 de 0.132 m/s, e uma direcção predominante para Sul (entre 1.55 m e 8.55 m) e para entre SE e SSE (entre os 8.55 m e o fundo) com média igual a 176.14°.

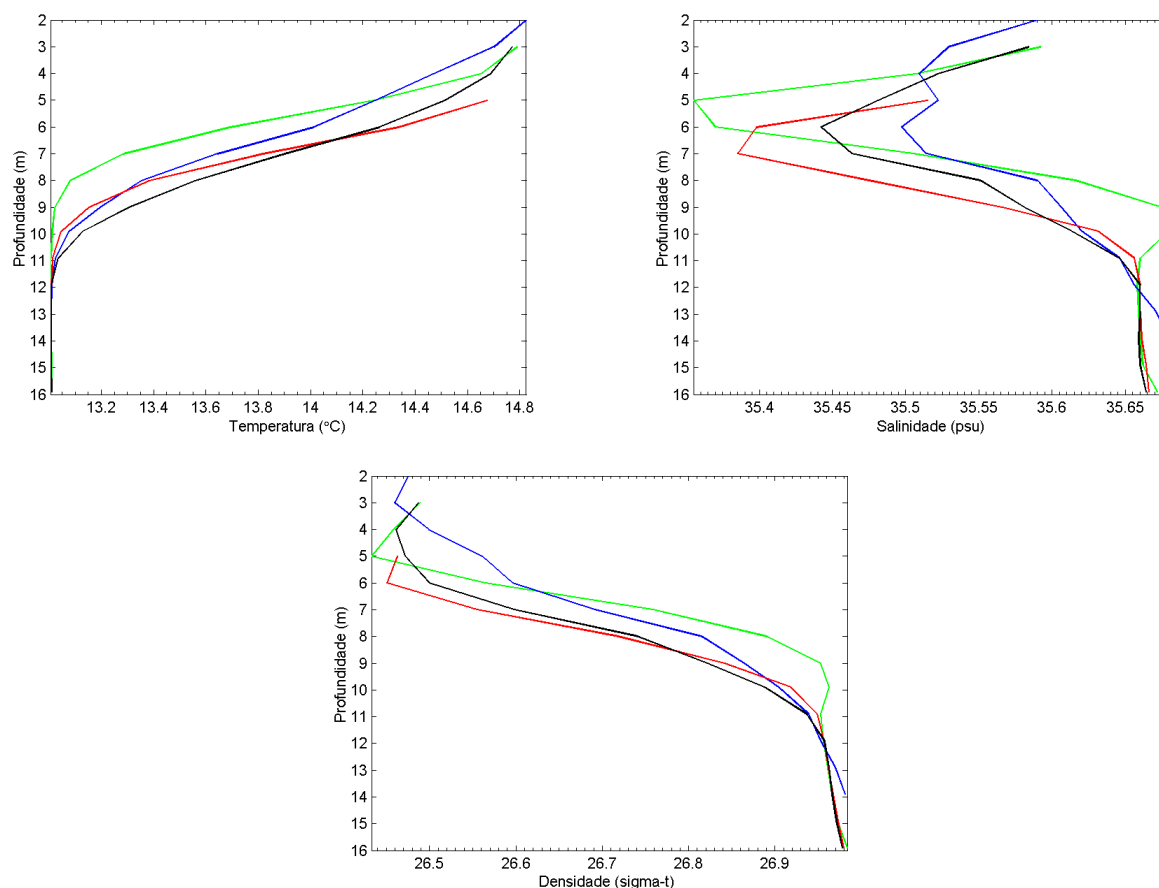


Figura 11. Perfis verticais de TSD em 4 estações na vizinhança do exutor, fora da zona de dispersão

Durante a execução da missão foram obtidos 4 perfis verticais de CTD utilizando um sensor externo, em pontos localizados aproximadamente à distância de 500 m para Oeste do ponto médio do difusor. Os dados de temperatura, salinidade e densidade de cada um destes perfis encontram-se representados, à mesma cor, na Figura 11. Estes dados são representativos das condições de estratificação da coluna de água sem a influência da presença da pluma.

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 podem ser encontrados em Ramos (2005) e Zhang (2001). Este processamento foi integrado num sistema automático de tratamento de dados modular, que pode ser utilizado em campanhas semelhantes.

Secções longitudinais dos resultados do MCMQ relativos à salinidade encontram-se representados na Figura 12. A cor azul indica zo-

nas menos salinas, ou seja a presença da pluma, e a cor vermelha indica zonas mais salinas. Estes dados permitem identificar 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 a efeitos densimétricos que prevaleceram sobre a 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 (1992) e Petrenko (1998) observaram diferenças da mesma ordem de grandeza. Os perfis verticais de salinidade obtidos por Petrenko (1998) no centro e sobre

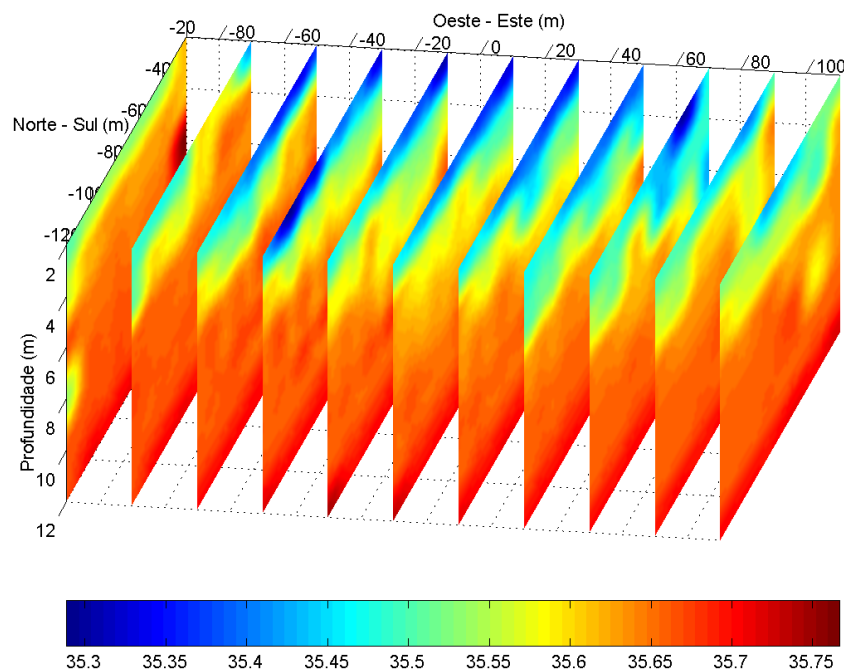


Figura 12. Seções longitudinais dos resultados de salinidade (psu)

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 (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, 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.

Estimação da diluição da pluma

A diluição da pluma foi estimada representando os dados de temperatura e salinidade num diagrama $T-S$, com linhas de mistura inicial entre as características do efluente e as das águas ambientais ao nível da descarga (Figura 13). Os detalhes deste método podem ser encontrados em Washburn (1992), Petrenko (1998) e Ramos (2005). Após a saída do efluente (com tempe-

ratura Te e salinidade Se) através dos orifícios do difusor inicia-se o processo da sua mistura com as águas do meio receptor (com temperatura Ta e salinidade Ta) à profundidade da descarga. Num diagrama $T-S$, a temperatura e a salinidade da massa de água da mistura, respectivamente Tm e Sm , correspondem a um ponto na linha de mistura que une os pontos do efluente e do meio. As características Tm e Sm variam de acordo com o factor de diluição entre o efluente e as águas do meio receptor. Para uma dada diluição S , Tm e Sm são respectivamente iguais a (Fischer, 1979):

$$Tm = Ta + \frac{Te - Ta}{S} \quad (10)$$

$$Sm = Sa + \frac{Se - Sa}{S} \quad (11)$$

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, 1996). As medições obtidas indicam que parte desta mistura inicial com o 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.

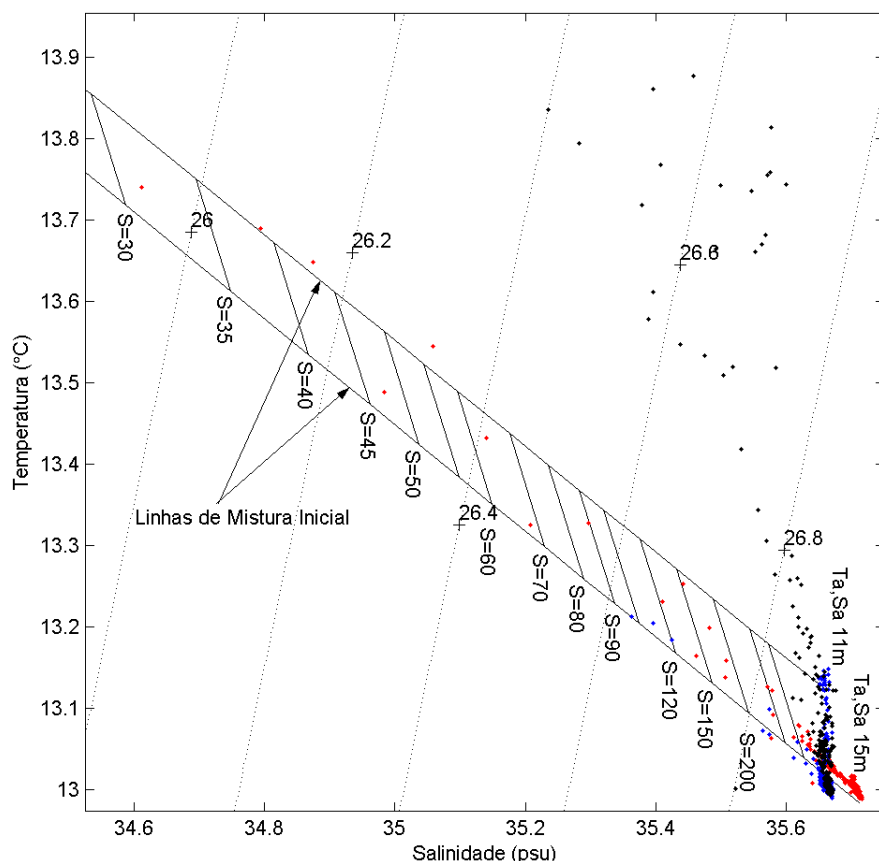


Figura 13. Diagrama T-S dos dados da secção 1

A Figura 13 mostra os dados de temperatura e salinidade da secção 1, representados num diagrama. As medições obtidas à mesma profundidade estão representadas com a mesma cor: vermelho, azul e preto correspondem, respectivamente, a medições obtidas aos 12, 10 e 8 m de profundidade.

Simultaneamente, foram também representadas linhas de mistura inicial entre o ponto correspondente ao efluente $T_e = 35^\circ\text{C}$ e $S_e = 2\text{psu}$ (não visível), e os dois pontos correspondentes ao meio receptor (e) relativos às profundidades 15 e 11 m. As linhas que unem os pontos destas duas com a mesma diluição, delimitam zonas de diluição inicial. Diluições desde 30 até 400 estão representadas na figura. A diluição é estimada com base no facto de que os pontos correspondentes à pluma são membros desta mistura entre o efluente e o meio receptor. Os pontos com menor diluição que se encontram na zona de mistura inicial indicam a diluição inicial, proporcionada fundamentalmente pelo fluxo da quantidade de movimento na descarga (efeito "jacto"). Os pontos localizados fora da zona de mistura inicial correspondem a zonas que experimentaram outros processos mistura. De acordo

com estes resultados, a diluição da pluma foi, consistentemente, superior a 300.

CONCLUSÕES

É importante monitorizar as descargas de efluentes provenientes de exdutores submarinos, mas as técnicas tradicionais são habitualmente dispendiosas e ainda não conseguem dar uma resposta satisfatória. Por isso se justifica a procura de metodologias mais eficientes, sendo que a utilização de VSAs se perfila como uma das mais promissoras. Para o sucesso destas campanhas de monitorização é importante, na fase de planeamento, dispor de ferramentas que permitam estimar à priori a localização e dimensões das plumas de efluente, pelo que a modelação matemática se revela um instrumento da maior utilidade, justificando-se os esforços para o seu aperfeiçoamento. 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 fluido. A partir destas medições 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 de mistura, mas também para a comparar com observações do fenómeno obtidas *in situ*.

REFERÊNCIAS

- Alt, C.V., Allen, B., Austin, T. y Stokey, R., (1994). Remote environmental measuring units. Proceedings of Autonomous Underwater Vehicles'94 Conference.
- Carvalho, J.L.B., Roberts, P.J.W. y Roldão, J., (2002). Field observations of the Ipanema beach outfall. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(2), 151–160.
- Daviero, G.J., (1998). Hydrodynamics of ocean outfall discharges in unstratified and stratified flows. PhD. Thesis. Georgia Institute of Technology, Atlanta.
- Daviero, G.J., Roberts, P.J.W. y Maile, K., (2001). Refractive index matching in large-scale stratified experiments. *Exp. Fluids*, 31, 119–126.
- Daviero, G.J. y Roberts, P.J.W., (2006). Marine wastewater discharges from multiport diffusers. III: Stratified Stationary Water. *Journal of Hydraulic Engineering*, 132(4), 404–410.
- Directiva 76/160/CEE, (1976). Directiva do Conselho de 8 de Dezembro de 1975 relativa à qualidade das águas balneares. *Jornal Oficial das Comunidades Europeias*.
- Directiva 91/271/CEE, (1991). Directiva do Conselho de 21 de Maio de 1991 relativa ao tratamento de águas residuais urbanas. *Jornal Oficial das Comunidades Europeias*.
- DL 74/90, (1990). Decreto-Lei n 74/90 de 7 de Março. *Diário da República - Série I-A*, pp. 981–1024.
- DL 152/97, (1997). Decreto-Lei n 152/97 de 19 de Junho (transposição). *Diário da República - Série I-A*, pp. 2959–2966.
- DL 236/98, (1998). Decreto-Lei n 236/98 de 1 de Agosto. *Diário da República - Série I-A*, pp. 3676–3722.
- Faisst, W.K., McDonald, R.M., Noon, T. y 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. y 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. y 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. y 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. y Schleicher K., (1980). A new high pressure equation of state for seawater. *Deep-Sea Research* 27A, 255–264.
- Neves, M. y Neves, A., (1992). Descarga de águas residuais no mar. *Exutores Submarinos*. *Revista da Ordem dos Engenheiros*. Ano VII, No. 62, pp. 43–50.
- Petrenko, A.A., Jones, B.H., Dickey, T.D., LeHaitre, M. y 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. y 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. y 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. y 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. y Pereira, F.L., (2000b). Prediction studies for an AUV monitoring mission plan. Fifth

- International Conference on the Mediterranean Coastal Environment, Hammamet, Tunisia, October 2001, pp. 1299–1310.
- Ramos, P., Neves, M.V. y 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., (1979). Line plume and ocean outfall dispersion. *Journal of Hydraulic Division, ASCE* 105 (4), 313–330.
- Roberts, P.J.W., Snyder, W. y Baumgartner, D., (1989). Ocean outfalls. *Journal of Hydraulic Engineering*, 115 (1), 1–70.
- Roberts, P.J.W., (1996). Sea outfalls. *Environmental Hydraulics*, V.P. Singh and W. H. Hager (eds.), Kluwer Academic Press, pp. 63–110.
- 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. y 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., Chrysostomidis, C., Dickey, T.D., Levine, E., Petrikalakis, N., Porter, D.L., Rothschild, B.J., Schmidt, H., Sherman, K., Holliday, D.V. y 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.
- Tian, X., Roberts, P. y Daviero, G., (2004a). Marine wastewater discharges from multiport diffusers. I: Unstratified Stationary Water. *Journal of Hydraulic Engineering*, 130(12), 1137–1146.
- Tian, X., Roberts, P.J.W. y Daviero, G., (2004b). Marine wastewater discharges from multiport diffusers. II: Unstratified Flowing Water. *Journal of Hydraulic Engineering*, 130(12), 1147–1155.
- Tian, X., Roberts, P.J.W. y Daviero, G., (2006). Marine wastewater discharges from multiport diffusers. IV: Stratified Flowing Water. *Journal of Hydraulic Engineering*, 132(4), 411–419.
- Washburn, L., Jones, B.H., Bratkovich, A., Dickey, T.D. y Chen, M., (1992). Mixing, dispersion and resuspension in vicinity of ocean wastewater plume. *Journal of Hydraulic Engineering*, 118(1), 38–58.
- Wright, S.J., (1984). Buoyant jets in density-stratified crossflow. *Journal of Hydraulic Engineering*, 110(5), 643–656.
- Wu, Y., Washburn, L. y 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., Mannov, D. y 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. y Lu, M., (2001). Least-squares collocation meshless method. *Int. Journal for Numerical Methods in Engineering*, 51, 1089–1100.