CAPÍTULO 7 JATOS E PLUMAS TURBULENTAS – EMISSÁRIOS SUBMARINOS E SUBAQUÁTICOS – ESTUDOS DE CASO

Nesse capítulo serão tratados os escoamentos turbulentos que ocorrem longe de fronteiras sólidas, caracterizando o que se chama na literatura inglesa de *free shear flow* e restringindo-se aos escoamentos de jatos e plumas, que são os de maior interesse à minha linha de pesquisa associada ao fenômeno da dispersão de efluente em meio hídrico.

7.1. Jatos Planos Turbulentos

A turbulência é gerada ao lançar-se um jato em um meio fluido, onde ocorre uma transição súbita na descarga do jato entre um campo de vorticidade turbulento em seu interior e um campo tipicamente irrotacional externamente ao jato. Nessa interface o escoamento é intermitente e pode-se dizer, de acordo com a literatura *(Davidson, 2007)*, que o jato será turbulento para Re ~ 10^4. Em um jato plano o escoamento médio é caracterizado por $U_x >> U_y$ e $\frac{\partial}{\partial x} << \frac{\partial}{\partial y}$.

O estabelecimento das equações do movimento de um jato plano turbulento permanente parte de algumas hipóteses simplificadoras:

- O gradiente axial das tensões de Reynolds é muito menor que o gradiente transversal.
- As tensões viscosas são desprezíveis.
- A componente transversal do termo de aceleração convectiva é desprezível.
- O gradiente de pressão na direção axial é muito pequeno.

Essas hipóteses simplificadoras permitem escrever as equações do movimento de um jato plano, permanente e incompressível na seguinte forma:

$$U_x \frac{\partial U_x}{\partial x} + U_y \frac{\partial U_x}{\partial y} = \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} \qquad (7.1)$$

$$\frac{\partial U_x}{\partial x} + \frac{\partial U_y}{\partial y} = 0 \qquad (7.2)$$

PME5025 Fundamentos da Turbulência 2016 Prof. Jayme P. Ortiz EPUSP

A figura 7.1 é uma representação esquemática de um jato plano turbulento:

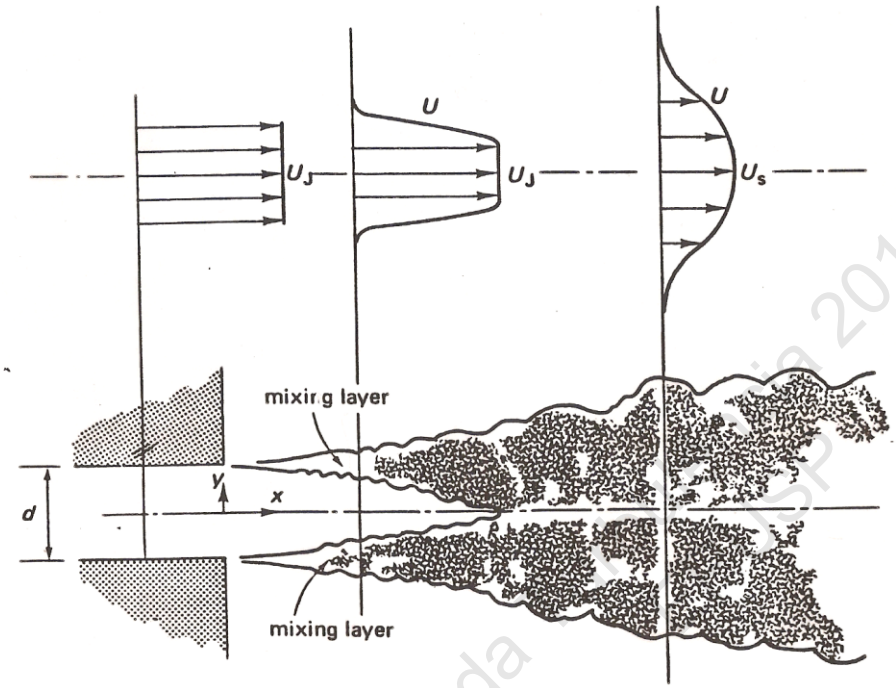


Figura 7.1 Representação esquemática de um jato plano turbulento

Tradicionalmente existem duas maneiras distintas de se modelar o escoamento em jatos turbulentos: a primeira usando o argumento de uma taxa de arraste de fluido adjacente e a segunda usando a hipótese de Boussinesq-Prandtl da viscosidade turbulenta.

Inicialmente sabe-se que o jato ao ser descarregado no meio fluido tem grande quantidade movimento, gerando-se turbulência em seu interior e alargando-se com o arraste do fluido adjacente *(entrainment).* Embora o fluxo de massa aumente devido ao arraste de fluido adjacente, o fluxo de quantidade de movimento, no entanto, é conservado ao longo do jato. Sendo *d* a largura inicial do jato, comprova-se experimentalmente que a partir de x~30d (região desenvolvida após a *mixing layer*) o jato comporta-se gaussianamente, de modo que a estrutura do escoamento passa a ser controlada apenas pela velocidade local do jato na linha central U_c e pela largura do jato $\delta(x)$,ou seja o jato adquire a condição de similaridade de perfis *(self-similar structure):*

$$\frac{U_x}{U_c(x)} = f\left(y/\delta(x)\right) = f(\eta) \qquad (7.3)$$

PME5025-Fundamentos da ... USP
Prof. Jayme P. Ortiz ... 2016

Dessa forma, tem-se que os fluxos de quantidade de movimento e de massa, por unidade de largura, para a região desenvolvida do jato, são dados por:

$$M = \int_{-\infty}^{+\infty} \rho U_x^2 dy = \rho U_c^2 \delta \int_{-\infty}^{+\infty} f^2 d\eta \tag{7.4}$$

$$\dot{m} = \int_{-\infty}^{\infty} \rho U_x dy = \rho U_c \delta \int_{-\infty}^{\infty} f(\eta) d\eta \tag{7.5}$$

O coeficiente de arraste de fluido adjacente ao jato *(α)*, que é proporcional às flutuações de velocidades locais *u* e a velocidade média local do jato *U*, pode ser representado na zona desenvolvida do jato como:

$$d\delta / dx = \alpha \tag{7.6}$$

e , sendo assim:

$$\frac{d}{dx}\left(\dot{m}\right) = \alpha \rho U_c \int_0^{\infty} f(\eta) d\eta \tag{7.7}$$

Prandtl em 1942 apresentou uma forma simplificada para o coeficiente de viscosidade turbulenta em jatos planos $\mu_t \sim \rho b \delta(x) U_{c(}(x)$ *(apud Davidson, 2007)*, de modo que a equação do movimento para jatos planos (equação 7.1) poderia ser escrita como:

$$U_x \frac{\partial U_x}{\partial x} + U_y \frac{\partial U_x}{\partial y} = b\delta(x) U_c(x) \frac{\partial^2 U_x}{\partial y^2} \tag{7.8}$$

Equação essa que admite solução de similaridade conduzindo as seguintes expressões *(Davidson, 2007):*

$$\alpha = \frac{d\delta}{dx} = \frac{4b}{\lambda^2} \tag{7.9}$$

$$\frac{U_x}{U_c} = f\left(\frac{y}{\delta}\right) = \sec h^2\left(\frac{y}{\lambda\delta}\right) \tag{7.10}$$

$$\mu_t = \rho \nu_t \approx 0{,}008 \rho \delta U_c \tag{7.11}$$

sendo: λ = 0,275, admitindo-se a velocidade do jato caindo de 10%, quando $y = \pm \frac{\delta}{2}$.

PME5825-Fundamentos da Turbulência 2016 EPUSP Prof. Jayme P. Ortiz

7.2. Jatos Circulares Turbulentos

Os jatos circulares, ditos axissimétricos, semelhantemente aos jatos planos, caracterizam-se por $U_x \succ\succ U_r$ e $\frac{\partial}{\partial x} \prec\prec \frac{\partial}{\partial r}$, usando-se coordenadas polares. Para valores de $x \geq 30d$, a jusante da fonte, os perfis médios de velocidade dependem somente da posição radial *r*, da largura local do jato, δ, e da velocidade local na linha central U_c. Para a região do jato desenvolvida pode-se adotar a solução de similaridade para os perfis:

$$\frac{U_x(r,x))}{U_c(x)} = f\left(\left(\frac{r}{r_{1/2}(x)}\right)\right) = f(\xi) \tag{7.12}$$

As hipóteses simplificadoras para jatos axissimétricos são as mesmas já apresentadas para jato plano e as equações do movimento de um jato circular turbulento permanente podem ser escritas, a partir das equações da camada limite *(ver Pope 2006)*, obtendo-se:

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{1}{r}\frac{\partial (rV)}{\partial r} = 0 \tag{7.13}$$

$$U\frac{\partial U}{\partial x} + V\frac{\partial U}{\partial r} = \frac{\nu}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial U}{\partial r}\right) - \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\overline{uv}\right) \tag{7.14}$$

Desprezando o termo viscoso na equação acima e multiplicando-a por *r*, resulta, segundo *Pope,2006:*

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(rU^2\right) + \frac{\partial}{\partial r}\left(\left(r\frac{U}{V}\right) + r\overline{uv}\right) = 0 \tag{7.15}$$

A integração dessa equação com relação à *r* conduz ao conceito de fluxo de quantidade de movimento que é constante ao longo do jato, conforme já discutido:

$$M = \int_0^\infty 2\pi r\rho U_x^2 dr = 2\pi\rho\left(r_{1/2}U_c\right)^2 \int_0^\infty \xi f^2(\xi) d\xi \tag{7.16}$$

Observa-se que nesse caso o perfil similar de velocidade média é definido a partir de:

$$U(x,r) = U_c(x)\, f(\xi) \tag{7.17}$$

PME5325 - Fundamentos da Turbulência 2016
Prof. Jayme R. Ortiz
EP-USP

Onde: $$\xi = \frac{r}{r_{1/2}(x)}$$

De uma maneira análoga pode-se definir o fluxo de massa de um jato livre circular como:

$$\overset{*}{m} = \int_0^\infty 2\pi r \rho U_x dr = 2\pi\rho\left(r_{1/2}U_c\right)\int_0^\infty \xi f(\xi) d\xi \qquad (7.19)$$

Pope, 2006 define a taxa linear de espalhamento do jato circular *(spreading)* como:

$$S = \frac{dr_{1/2}}{dx} \qquad (7.20)$$

Estabelecendo, portanto, uma relação entre η e ξ:

7.2.1. Observações Experimentais de Jatos Circulares Turbulentos

Medições experimentais de Hussein et al (1994) para Re = 95500 *(apud Pope,2006)* mostram (figura 7.2) a variação dos perfis de velocidade média de jato circular *(<U>=U)* ao longo da direção x, com relação a velocidade de descarga do jato U_j verificando-se o comportamento gaussiano desses perfis, assim como o seu abatimento progressivo.

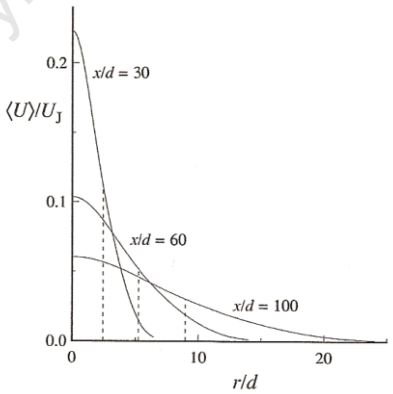


Figura 7.2. Perfis normalizados de velocidade média axial de jato circular turbulento para Re = 95500 (dados de Hussein et al, 1994) (extraído de POPE, 2006)

PME5325-Fundamentos da Turbulência 2016
Prof. Jayme P. Ortiz
EPUSP

Na figura 7.3 é possível verificar a variação dos perfis de velocidade média normalizados *(U/U_c)* em função da coordenada normalizada na direção radial $r/r_{1/2}$, observando-se que os perfis colapsam em uma única curva, a partir da zona desenvolvida do jato (x/d>30), de acordo com as medidas de Wygnansky e Fiedler, (1969), podendo-se concluir, portanto, a similaridade dos perfis de velocidade.

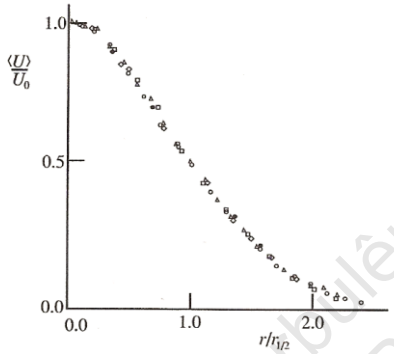


Figura 7.3 Perfis de velocidade axial em jato circular turbulento para Re ≈ 10^5. Medidas de Wygnansky e Fiedler, 1969 (símbolos ° x/d= 40; Δ x/d=50; □ x/d =60; ◊ x/d = 75; • x/d = 97,5(extraído de Pope, 2006).

A tabela 7.1 mostra valores da taxa de espalhamento *S do jato* e da taxa de decaimento de velocidade *B* para diferentes valores de Reynolds e diferentes métodos de medição de velocidades, sendo *B* definido como:

$$\frac{U_c(x)}{U_j} = \frac{B}{(x - x_0)/d} \qquad (7.20\ a)$$

Tabela 7.1 Valores experimentais de S e B para jatos circulares turbulentos (extraído de POPE, 2006)

	Panchapakesan e Lumley (1993)	Hussein et al (1994) hot wire data	Hussein et al (1994) Laser-doppler data
Re	11.000	95.500	95.500
S	0,096	0,102	0,094
B	6,06	5,9	5,8

PME5321-Fundamentos da Turbulência 2016 Prof. Jayme P. Ortiz EPUSP

Os resultados mostram que os valores do coeficiente de espalhamento *S e* da taxa de decaimento de velocidade *B* não dependem de Re. Esses resultados comprovam o que já foi apresentado no capítulo 4 através da figura 4.6, que é uma representação esquemática de um jato livre com Re do escoamento mais baixo e mais alto, observando-se que a dimensão do jato não se altera, mas, para Reynolds mais alto a turbulência é mais desenvolvida com o predomínio das menores escalas de turbulência. Podemos afirmar que a taxa de espalhamento de jatos com valores de Re maiores de um fator de 1000 é a mesma, sendo que o perfil de velocidade média e a taxa de espalhamento não dependem de Re. Como o jato se espalha linearmente e a taxa de espalhamento é constante tem-se que:

$$r_{1/2} = S(x - x_0) \; ou \qquad (7.21)$$

$$r_{1/2} \sim x$$

Desde que os perfis de $\overline{uv}$ e de $\frac{\partial U}{\partial r}$ apresentam solução de similaridade, o perfil de viscosidade turbulenta também deve apresentar solução de similaridade, onde:

$$\nu_t = U_c(x) r_{1/2}(x) \hat{\nu}_t(\eta)$$

Os resultado apresentados em Pope (2006) e baseados nas medições de Hussein et al (1994) mostram valores de perfis normalizados de ν_t na zona central do jato, onde $\hat{\nu}_t \sim 0{,}03$ decaindo para zero nas fronteiras do jato.

7.3. Jatos e Plumas Turbulentas Submersas em Meio Hídrico

Definem-se jatos turbulentos submersos sob o efeito de empuxo *(buoyant jets* ou "jatos boiantes" lembrando o saudoso professor Occhipinti) ou plumas turbulentas submersas, como a descarga de líquido de um orifício ou ranhura em um corpo d´água de grandes dimensões com densidade ou temperatura diferente da descarga. O que diferencia o jato, da pluma, é o valor de quantidade de movimento na seção de descarga quando comparado com o valor do empuxo no meio fluido receptor. O número adimensional que melhor caracteriza os jatos e plumas na seção de descarga é o número de Froude densimétrico, que é uma relação entre força de inércia e força de empuxo (gravidade modificada pelo empuxo):

PME5305-Fundamentos da Turbulência 2016
Prof. Jayme P. Ortiz
EPUSP

$$F_{d0} = \frac{U_0}{\sqrt{\frac{\Delta\rho}{\rho} gy}} \qquad (7.22)$$

Sendo assim, os jatos horizontais submersos descarregando com $Fd_0 \to \infty$ comportam-se como jatos puros (predominância da quantidade de movimento) ao passo que, os jatos horizontais submersos descarregando com $Fd_0 \cong 1$ comportam-se como plumas puras (predominância de empuxo). Na prática de aplicação na área de hidráulica predomina a condição intermediária de jatos sob a ação de empuxo *(buoyant jets).*

A *figura 7.4* é uma representação esquemática da descarga de um jato em um meio ambiente sob a ação de empuxo.

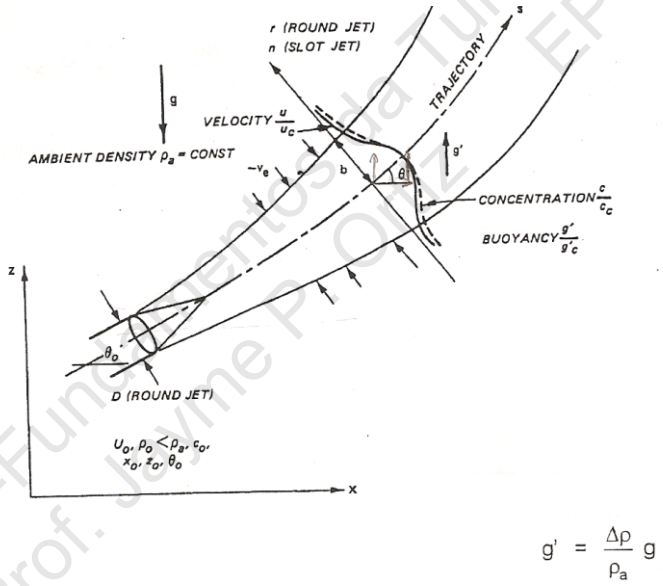


Figura 7.4 Representação esquemática de um jato circular descarregando em um ambiente não estratificado sob a ação de empuxo (buoyant jet)

PME5325-Fundamentos da Turbulência 2016
Prof. Jayme P. Ortiz
EPUSP

7.4. A Modelagem Física de Jatos e Plumas Turbulentas em Meio Hídrico

Silberman & Stefan (1970) estabelecerem os principais parâmetros que influenciam o comportamento dos jatos e plumas térmicas para estudos em modelos físicos:

<u>*Parâmetros de Descarga:*</u>

I) *Características do efluente:* vazão, diferenças de massa específica, velocidade de saída.

II) *Características da saída:* localização, orientação, submersão, forma, dimensões.

III) *Parâmetros no Meio Hídrico Receptor:*

I) Dinâmica do fluxo: campo de velocidades pré-existente, correntes de maré, vento induzido e outras correntes, ondas superficiais, turbulência livre.

II) Estratificação: estratificação preexistente devido à temperatura, materiais sólidos presentes e solventes, efeitos de vento e maré na estratificação.

III) Características geométricas: forma, dimensões, batimetria, configurações do leito e rugosidade perto da saída.

IV) *Parâmetros da Atmosfera:*

I) Vento: velocidades, tensões de cisalhamento na superfície da água.

II) *Ar:* temperatura, umidade relativa.

III) Radiação solar.

Dentre os principais grupos adimensionais utilizados na modelagem de jatos e plumas turbulentas destacam-se, além do número de Froude densimétrico na saída F_{d_0}, já definido, os seguintes adimensionais:

- Número de Reynolds na saída: $\mathrm{Re}_0 = \dfrac{U_0 d_0}{\nu_0}$;
- Número de Richardson que indica o estabelecimento de um fluxo estratificado, onde grandes valores de Richardson (*Ri>1)* indicam uma estratificação estável e conseqüentemente uma redução no transporte vertical de quantidade de movimento.

$$R_i = \frac{-g}{\rho}\frac{d\rho/dz}{(du/dz)^2} \qquad (7.23)$$

Para facilitar o estudo experimental de jatos e plumas costuma-se estudar o escoamento como composto de três regiões seqüenciais: o domínio do campo próximo *(near field)* ou região de saída, situada ao redor do ponto de emissão do jato ou pluma,

PME5325-Fundamentos da Turbulência 2016 Prof. Jayme P. Ortiz EPUSP

região fortemente afetada pelas condições de descarga; região intermediária do campo de transição; região do campo distante *(far field)*, que é a região que não é afetada diretamente pelas condições impostas na seção de saída.

A *figura 7.5* dá uma idéia de escalas de comprimento e tempo na análise dos processos físicos de descarga de jatos em meio ambiente aquático, escalas essas que variam muito, dependendo da região de interesse (campo próximo, de transição ou distante), o que torna complicado o uso de modelos hidráulicos reduzidos.

A *figura 7.6* mostra que dependendo da região de interesse de observação (campos próximo, de transição ou distante) devem-se construir modelos físicos ou computacionais específicos que se apliquem àquela região, utilizando-se os dados de entrada da região adjacente.

O principal papel hoje da modelagem física está na determinação de parâmetros experimentais para a calibração da modelagem numérica, utilizando-se instrumentações capazes de medir valores instantâneos de velocidade, pressão, temperatura, concentração etc.

PME5325-Fundamentos da Turbulência 2016
Prof. Jayme P. Ortiz
EPUSP

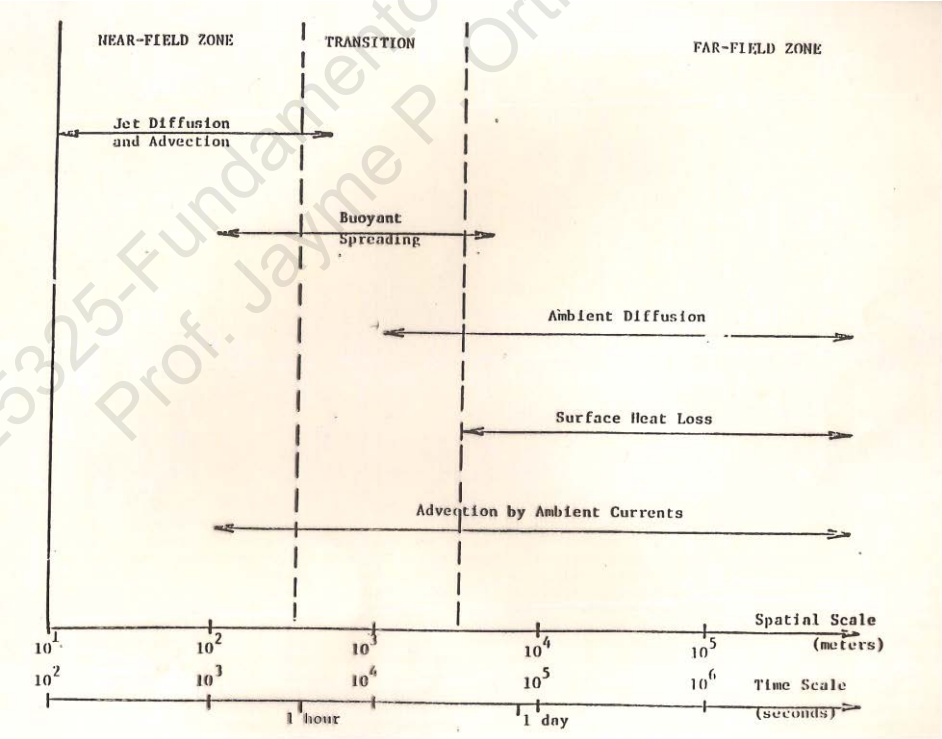


Figura 7.5 Processos físicos na descarga de jatos em meio hídrico e escalas típicas de comprimento e tempo para grandes descargas (extraído de Adams, 1993)

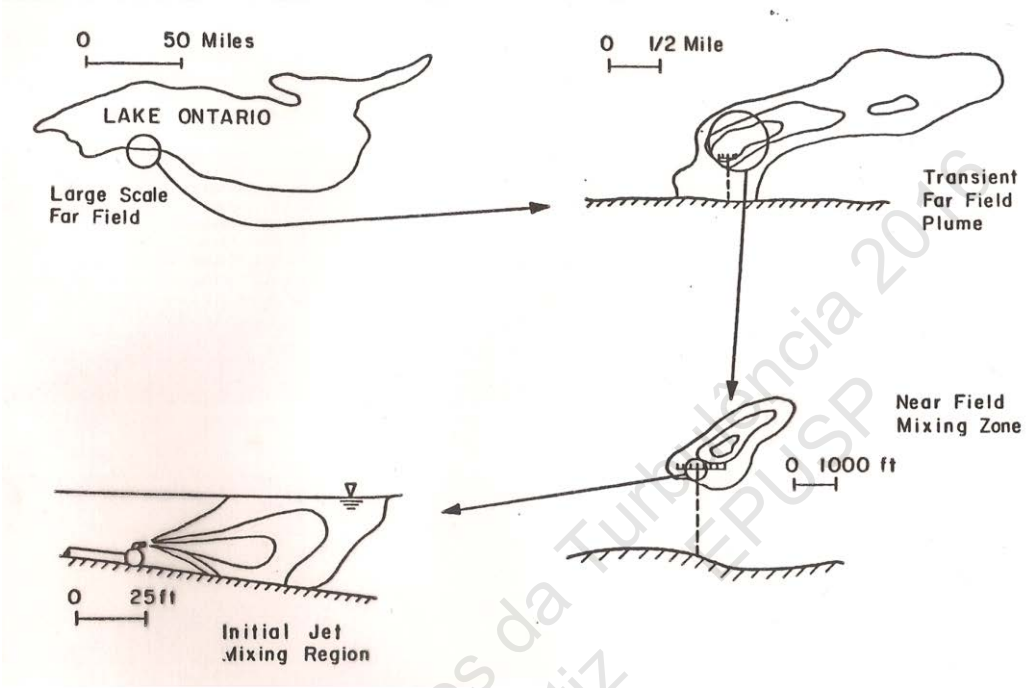


Figura 7.6 Regiões de interesse para a modelagem (extraído de Adams, 1993)

PME5025-Fundamentos da Turbulência 2016
Prof. Jayme P. Ortiz
EPUSP

7.5. Modelagem Hidrotérmica de Jatos e Plumas, com Lançamento Horizontal Submerso, em Reservatório Estagnado

A necessidade de um prognóstico da interferência ambiental advinda do lançamento de jato aquecido proveniente de sistemas de resfriamento de usinas termelétricas em reservatórios de água utilizados para abastecimento, para a geração de energia elétrica, ou, para o controle de enchentes, obrigam o desenvolvimento de modelagem hidrotérmica de jatos e plumas aplicados a essas regiões.

Com esse objetivo, Pinheiro (1998) desenvolveu um modelo matemático de jatos e plumas hidrodinâmico unidimensional para a determinação, no campo próximo, do processo de dispersão de um jato horizontal submerso aquecido descarregando em um reservatório de água estagnada, à temperatura ambiente. Além disso, ele construiu uma bancada experimental onde os jatos aquecidos foram determinados para a faixa de F_{do} entre 4 e 20. Os resultados do modelo físico, assim como os dados da literatura, foram

comparados com os resultados de simulação numérica e com a aplicação do sistema especialista *CORMIX – Cornell Mixing Zone Expert System,* que será apresentado posteriormente.

7.5.1. Modelo Matemático Hidrodinâmico Unidimensional

O modelo matemático desenvolvido por Pinheiro (1998) têm como parâmetros : a vazão do jato na descarga, a quantidade de movimento na descarga, a vazão em massa deficitária, o empuxo, a taxa de arraste de fluido adjacente, a relação de espalhamento lateral entre os perfis de velocidade e de massa específica.

Partindo das equações do movimento para jatos circulares, conforme discutidas anteriormente, pela integração dessas equações de derivadas parciais, considerando solução de similaridade e distribuição gaussiana para o jato *(ver JIRKA, 2001)*, obtêm-se as equações diferenciais ordinárias de primeira ordem que relacionam, ao longo da trajetória do jato, a velocidade do jato no centro do eixo longitudinal, o raio da pluma, a inclinação do eixo da trajetória com o plano horizontal e a diferença de massa específica existente entre o eixo da pluma e o fluido ambiental. A base do modelo matemático é a obtenção das equações diferenciais ordinárias abaixo discriminadas, que permitem a obtenção da evolução da velocidade do jato em sua linha central, do espalhamento do jato ao longo da trajetória, da evolução da inclinação do jato ao longo da trajetória, do processo de transferência de massa em seu interior em função da variação da massa específica na linha central e da trajetória do jato.

$$\frac{dU_c}{ds} = g\frac{\lambda^2\Delta\rho}{U_c\rho_0}\frac{2U_c\alpha}{b} \tag{7.24}$$

$$\frac{db}{ds} = 2\alpha - \frac{b}{U_c^2}g\lambda^2\frac{\Delta\rho}{\rho_0}sen\theta \tag{7.25}$$

$$\frac{d\theta}{ds} = \frac{2g\lambda^2}{U_c^2}\frac{\Delta\rho}{\rho_0}\cos\theta \tag{7.26}$$

$$\frac{d\Delta\rho}{ds} = \frac{\left(1+\lambda^2\right)}{\lambda^2}sen\theta\frac{d\rho_a}{dy} - \frac{2\alpha\Delta\rho}{b} \tag{7.27}$$

$$\frac{dx}{ds} = \cos\theta \tag{7.28}$$

$$\frac{dy}{ds} = sen\theta \tag{7.29}$$

PME5321-Fundamentos da Turbulência 2016 Prof. Jayme P. Ortiz EPUSP

Sendo:

s – trajetória do jato;

b – espessura característica do jato;

U_c – velocidade no centro do jato a uma dada distância da saída;

x – coordenada horizontal com origem no local de lançamento do efluente, após a zona de estabelecimento de fluxo;

y – coordenada vertical com origem no local de lançamento do efluente, após a zona de estabelecimento de fluxo;

α - coeficiente de arraste do fluido adjacente;

θ - ângulo do eixo longitudinal do jato com o plano horizontal;

λ - relação de espalhamento lateral entre os perfis de velocidade e de massa específica;

ρ_0 – massa específica do efluente na saída;

$\Delta\rho = (\rho_0 - \rho)$ – variação da massa específica no centro do jato em determinada posição ao longo da trajetória, com relação à saída;

ρ - massa específica no centro do jato em determinada posição ao longo da trajetória;

ρ_a – massa específica do fluido ambiental.

Os parâmetros utilizados no modelo de Pinheiro (1998), assim como as condições de contorno, estão resumidos a seguir:

Concentração do jato (efluente) ao longo de sua trajetória:

$$C = \left(\frac{T - T_a}{T_0 - T_a} \right) C_0 \qquad (7.28)$$

onde: $C_0 \rightarrow$ concentração do jato na saída do conduto;

$T \rightarrow$ temperatura no centro do jato em um ponto "s" da trajetória;

$T_0 \rightarrow$ temperatura de lançamento do jato;

$T_a \rightarrow$ temperatura ambiental.

Conservação da massa:

Para a conservação da massa ao longo do jato, admitiu-se:

PME-5325 Fundamentos da Turbulência 2016 Prof. Jayme P. Ortiz EPUSP

$$CU_c b = C_0 U_0 b_0 \qquad (7.29)$$

Admitindo-se um valor de referência $C_0 = 1$,

$$C = \frac{U_0 b_0}{U_c b} \qquad (7.30)$$

onde C_0 ,U_0 *e* b_0 correspondem as condições de saída do conduto, que admite-se nesse caso no final da região de estabelecimento do fluxo.

Comprimento da zona de mistura *(mixing layer)* de estabelecimento de fluxo:

Esse comprimento foi estabelecido como *6,2* b_0 segundo Albertson (apud JAMES,1984).

Variação da massa específica:

Para a variação da concentração do efluente em associação com o coeficiente de espalhamento λ, Albertson (apud – JAMES, 1984) propôs a seguinte relação:

$$C = \frac{1 + \lambda^2}{2\lambda^2} \qquad (7.31)$$

Por outro lado, a relação abaixo define a diluição do jato ao longo da linha central:

$$S = \frac{C}{C_0} = \frac{\rho_a - \rho}{\rho_a - \rho_0} \qquad (7.32)$$

ou, em termos de temperatura:

$$S = \frac{C}{C_0} = \left(\frac{T - T_a}{T_0 - T_a} \right) \qquad (7.33)$$

Valores do coeficiente de arraste (α) e do coeficiente de espalhamento lateral (λ):

Adotou-se, a priori, os valores de α = 0,082 e λ = 1,16 para jatos com efeito de empuxo e α = 0,057 e λ = 1,12 para jatos puros, de acordo com Albertson et al (apud Siberman e Stefan, 1970).

Velocidade do jato na fronteira:

PME5325-Fundamentos da Turbulência 2016 EPUSP Prof. Jayme P. Ortiz

Admitindo-se distribuição gaussiana de velocidades:

$$u(s,r) = ue^{-(r/\ b)^2} \tag{7.34}$$

Fazendo $r = b$:

$$u(s,b) = ue^{-(b/\ b)^2} = \frac{u}{e} = \frac{u}{2{,}718} = 0{,}3678u \tag{7.35}$$

Para a operação do modelo matemático, as equações diferenciais de 7.24 a 7.29 são resolvidas simultaneamente para um pequeno incremento de Δs ao longo da trajetória do jato, sendo utilizado o método de integração de quarta ordem de Range – Kutta. Os dados de entrada para o modelo computacional são: diâmetro inicial do jato, velocidade de lançamento, massa específica do jato bem como inclinação de saída com relação ao plano horizontal, além das condições de fluido ambiental. As saídas do modelo computacional são: x, y, u, θ, ρ, T, a cada incremento Δs ao longo da trajetória do efluente. Os cálculos do modelo terminam quando a superfície livre é alcançada ou quando a inclinação do jato muda de sinal. Informações completas do programa computacional denominado PLUMAC2.2, encontra-se na tese de doutoramento de Pinheiro (1998).

PME5325-Fundamentos da Turbulência 2016
Prof. Jayme P. Ortiz EPUSP

7.5.2. Instalações do Modelo Experimental

Para o estudo de descarga de jato horizontal submerso e aquecido foi especialmente construída uma instalação experimental no Centro Tecnológico de Hidráulica - CTH, na Universidade de São Paulo, conforme pode ser visto na *figura 7.7*. O estudo experimental foi feito em um tanque, de dimensões 2,00 x 2,10 x 1,82 m, apoiado sobre uma base de alvenaria, tendo uma das faces fechada com chapas de acrílico *(figura 7.8)* de modo a permitir a visualização da pluma aquecida. Os ensaios foram feitos com temperatura do jato de cerca de 10ºC acima da temperatura ambiente da água do tanque, utilizando-se para o aquecimento dois aquecedores eletrônicos instalados em série de 12 kW cada.

Para a alimentação do modelo utilizou-se água diretamente da rede pública, fazendo-se a regulagem fina de vazões através de válvulas do tipo agulha e medindo-se

as vazões através de rotâmetros. Esse sistema permitiu ensaios com vazões na faixa de 45 L/h a 955 L/h em regime permanente, o que garantiu simulações com número de Froude densimétrico de descarga do jato, na faixa do escopo do trabalho ($6 \leq F_{d0} \leq 20$).

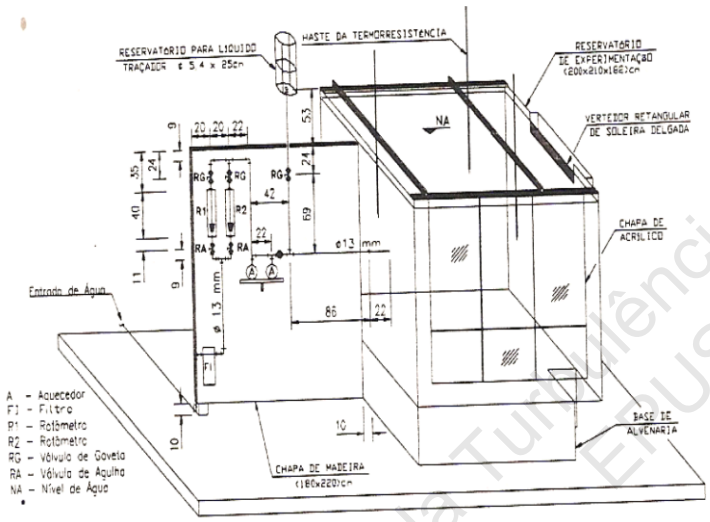


Figura 7.7. Vista em perspectiva cavaleira da instalação experimental

Conforme mostrado na *figura 7.7*, os experimentos foram conduzidos com o lançamento do jato aquecido através de um tubo horizontal de cobre de diâmetro 13 mm, a uma profundidade de 1,00 m em relação à superfície livre da água no tanque. O nível de água no tanque era mantido constante através de um vertedor de soleira delgada o que garantia o regime permanente.

Para a determinação da temperatura ao longo da trajetória do eixo do jato utilizaram-se 11 termoresistores do tipo PT – 100 (ver Pinheiro, 1998), que são sensores que se baseiam no princípio da variação da resistência ôhmica em função da temperatura, aumentando-se a resistência com o aumento da temperatura. Esses sensores foram calibrados a partir de um termômetro de quartzo do CTH, adotado como padrão, obtendo-se assim as curvas de calibração para cada sensor.

Para a visualização do desenvolvimento do jato aquecido ao longo de sua trajetória utilizou-se a injeção de permanganato de potássio ou de tinta solúveis em água *(figura 7.8).* Embora essa técnica forneça uma boa visão qualitativa do processo de dispersão da pluma, não fornece resultados quantitativos. Por outro lado, a utilização

PME5325-Fundamentos da Turbulência 2016 Prof. Javier P. Ortiz EPUSP

dos termoresistores PT-100 para a determinação das dimensões do jato/pluma não mostrou-se eficiente devido as oscilações de medida nas posições de fronteira entre o jato e o corpo hídrico receptor. Tentativas foram feitas ainda por Pinheiro (1998) com a utilização de um termovisor, equipamento que permite obter imagens térmicas, a partir da técnica de obtenção de espectro de infravermelho. Os resultados, nesse caso, só foram satisfatórios para a superfície livre do reservatório, o que não atendia aos objetivos da pesquisa. Finalmente optou-se pela utilização de uma bateria de termopares, que foram gentilmente emprestados pelo Departamento de Engenharia Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos – USP, juntamente com o seu respectivo *hardware e software*, equipamento esse utilizado na tese de doutoramento de Franzotti, 1998. Foram utilizadas 64 sondas termopares dispostas na forma de três telas arranjadas perpendicularmente à trajetória do jato, como pode ser visto na *figura 7.9.*

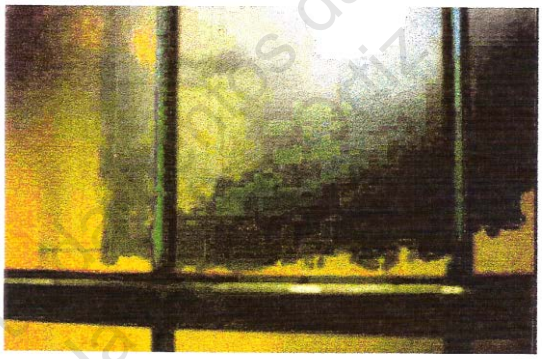


Figura 7.8. Visualização através de corante da trajetória do jato aquecido no reservatório de água estagnada à temperatura ambiente

Figura 7.9. Vista geral da instalação experimental utilizando as telas de termopares

7.5.3. Resultados do Modelo Experimental

Os resultados do estudo experimental foram comparados com a aplicação do modelo computacional *CORMIX – Cornell Mixing Zone Expert System*, desenvolvido para a *Environmental Protection Agency-USEPA.* Esses resultados foram comparados ainda com outros dados da literatura de *Cederwall, Abraham e outros (apud SILBERMAN & STEFAN, 1970)*, conforme pode ser visto nas *figuras 7.10 e 7.11*.

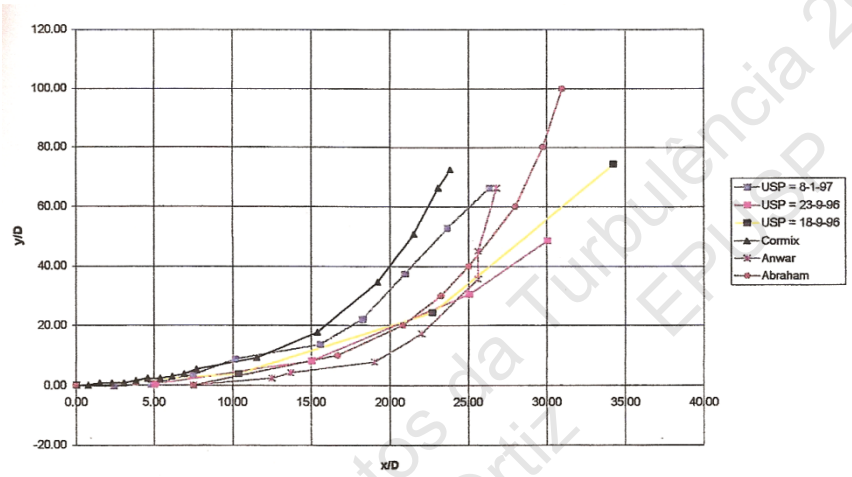


Figura 7.10 Trajetória do eixo do jato/pluma para Fd_0 = 6 – comparação com a aplicação do CORMIX e dados da literatura

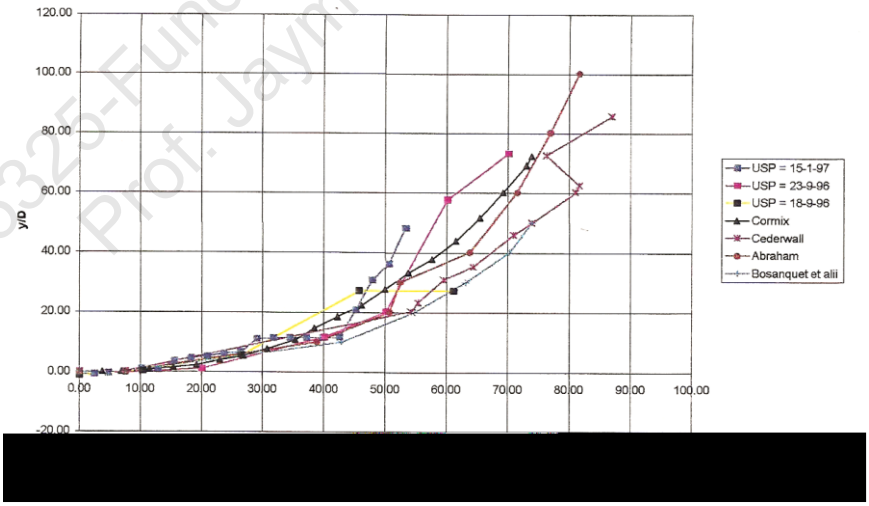


Figura 7.11 Trajetória do eixo do jato/pluma para Fd_0 = 20 – comparação com a aplicação do CORMIX e dados da literatura.

PME5325-Fundamentos da Turbulência 2016
Prof. Jayme P. Ortiz - EPUSP

Os resultados de Pinheiro (1998) ajustam-se, razoavelmente, com os resultados da literatura para ambos os valores de número de Froude densimétrico. A aplicação do modelo computacional *CORMIX* mostrou uma tendência mais acentuada de curvatura do eixo do jato/pluma em direção à superfície, particularmente para $Fd_0 = 6$.

As *figura 7.12 e 7.13* mostram a atenuação das concentrações ao longo do eixo do jato/pluma baseada na diferença entre a temperatura do jato e a temperatura do meio ambiente receptor. Novamente observa-se um decaimento mais rápido das concentrações quando se aplica o *CORMIX*, comparado com os dados experimentais, particularmente para $Fd_0 = 20$, resultando numa diluição mais rápida no campo próximo.

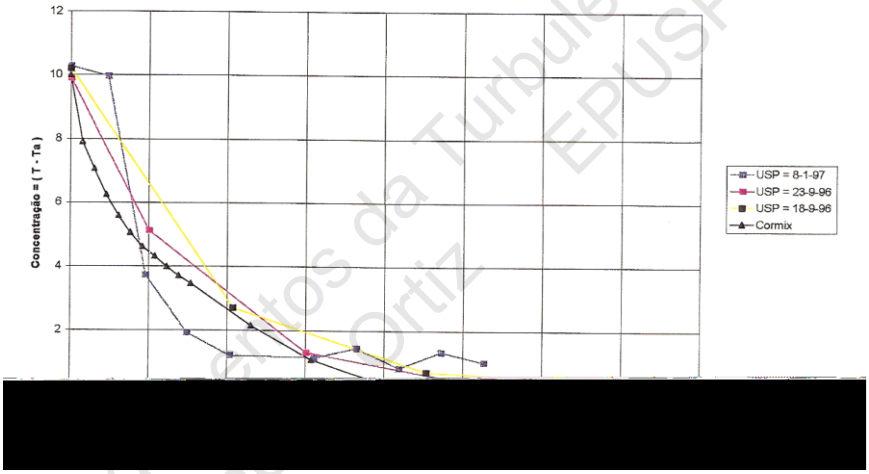


Figura 7.12 Variação da concentração no eixo do jato/pluma, baseada no decaimento da temperatura para $Fd_0 = 6$ – comparação com a aplicação do CORMIX.

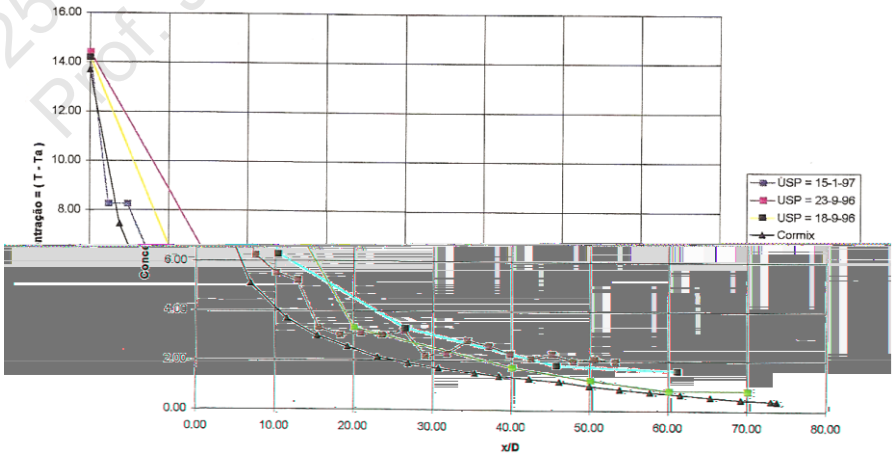
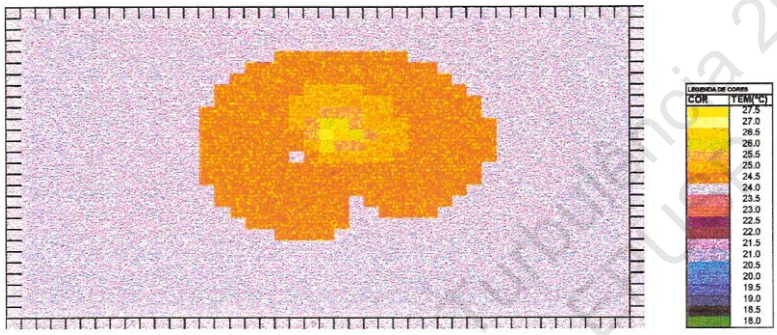


Figura 7.13 Variação da concentração no eixo do jato/pluma, baseada no decaimento da temperatura para $Fd_0 = 20$ – comparação com a aplicação do CORMIX.

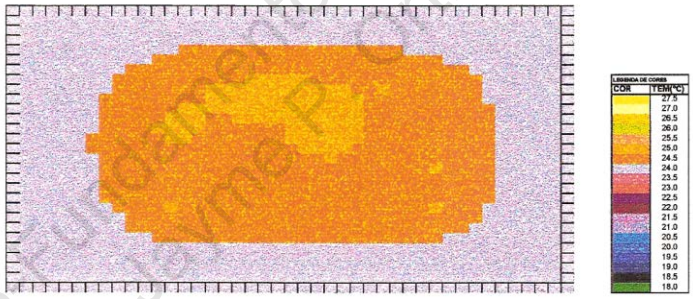
PME5325-Fund... Prof. Javier Ortiz ... EPUSP

Conforme já mencionado, para a obtenção da espessura do jato/pluma foram utilizados 64 termopares dispostos em telas (ver *figura 7.9).* A *figura 7.14* mostra o desenho das isotermas obtidas para $Fd_0 = 6$, na posição das três telas dispostas transversalmente ao jato. As cores mais claras correspondem às regiões de maiores temperaturas.

(A)



(B)



(C)

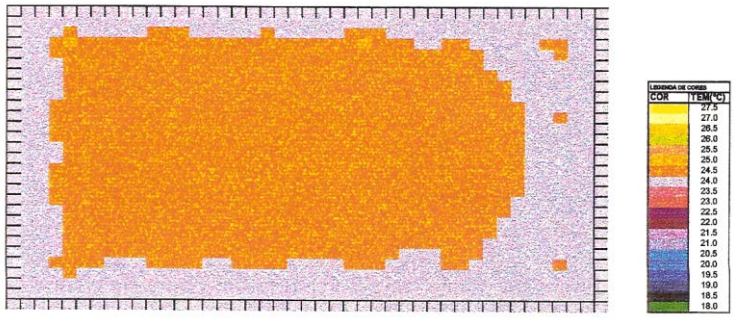


Figura 7.14 Desenho das isotermas obtidas nas posições das três telas (A,B,C) dispostas transversalmente ao jato/pluma, para $Fd_0 = 6$.

PME5325 - Fundamentos da Turbulência 2016
Prof. Jaime P. Ortiz

A *figura 7.15* mostra o traçado do perfil longitudinal do jato a partir das isotermas da figura anterior.

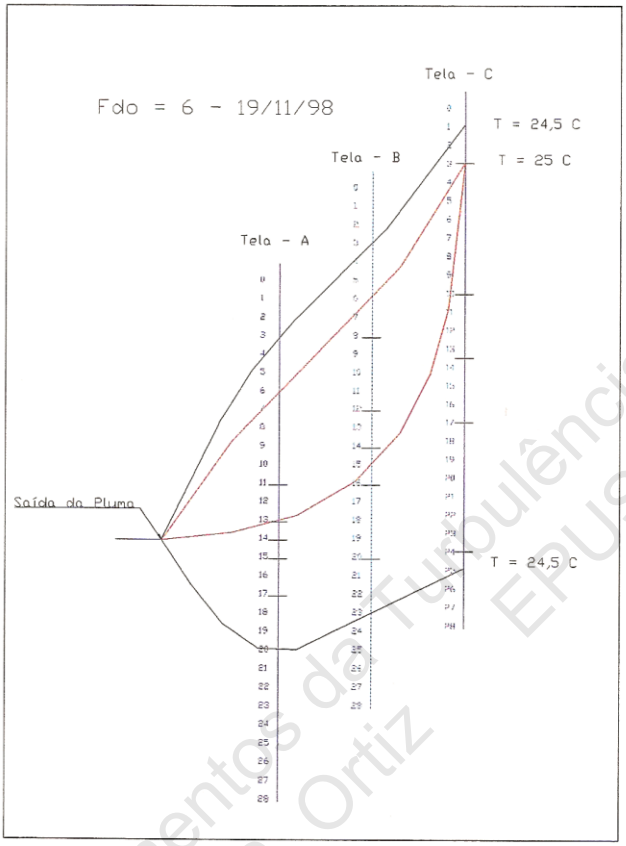


Figura 7.15 Perfil longitudinal do jato/pluma para $Fd_0 = 6$

A falta de um instrumento adequado para a medição experimental do campo de velocidades do jato/pluma impediu a calibração dos coeficientes de arraste α e de espalhamento lateral λ para a calibração do modelo matemático. Como as respostas obtidas com o modelo computacional *CORMIX* foram comparadas e analisadas com as experimentais, partiu-se para uma análise indireta de α e λ , utilizando-se dados da literatura e procurando-se as curvas de melhor ajuste na comparação dos resultados do *CORMIX e do PLUMAC2.2.* As simulações com o *PLUMAC2.2* foram feitas para valores de α = 0,082 e 0,060 e valores de λ = 1,16 e 1,12, considerando Fd_0 = 6, 11, 20. Esses valores estão de acordo com valores da literatura para jatos sob a ação de empuxo (primeiros valores) e para jatos sem a ação de empuxo (segundos valores) (*apud SILBERMAN & STEFAN, 1970*).

As *figuras 7.16 e 7.17* mostram os resultados comparativos da trajetória do eixo do jato, com a aplicação do *CORMIX e do PLUMAC2.2* para os valores de α e λ

PME5325-Fundamentos da Turbulência 2016 Prof. Jayme P. Ortiz EPUSP

mencionados acima e para Fd_0 = 6 e 20, respectivamente. Conforme já verificado na análise dos resultados experimentais, para ambos os gráficos, os resultados do *CORMIX* apresentam um maior efeito do empuxo sobre a trajetória do jato no campo próximo, quando comparado com os resultados do *PLUMAC2.2*

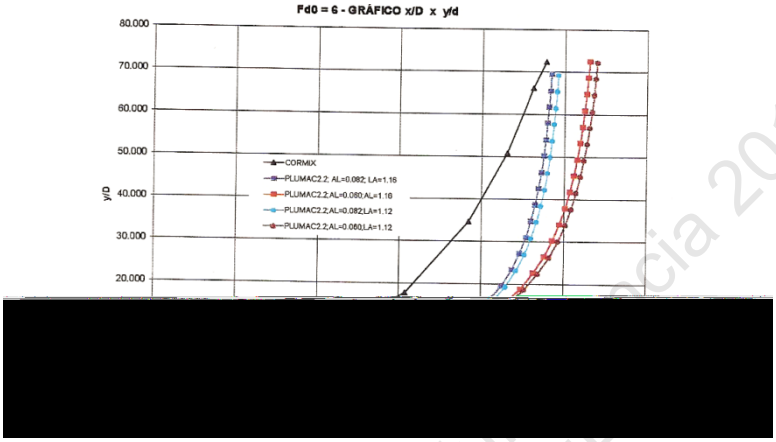


Figura 7.16 Trajetória do eixo do jato/pluma para Fd_0 = 6 – comparação com a aplicação do CORMIX e do PLUMAC2.2

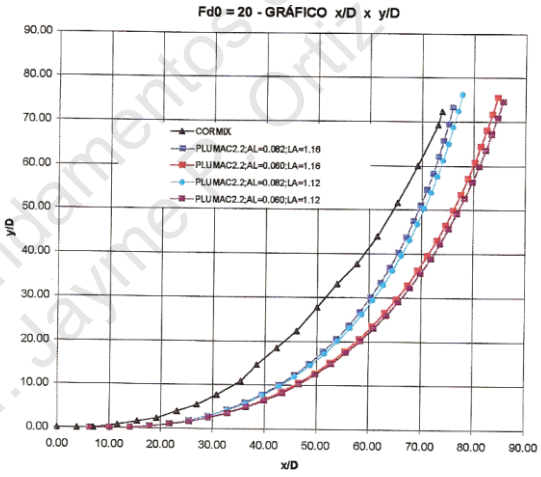


Figura 7.17 Trajetória do eixo do jato/pluma para Fd_0 = 20 – comparação com a aplicação do CORMIX e do PLUMAC2.2.

As *figuras 7.18 e 7.19* apresentam os resultados das concentrações baseadas no decaimento das temperaturas no eixo do jato com a aplicação do *CORMIX e do PLUMAC2.2* para os valores de α e λ mencionados acima e para Fd_0 = 6 e 20, respectivamente. Confirma-se a tendência nessas figuras de uma dispersão mais rápida de temperatura do jato em sua saída, quando da aplicação do CORMIX.

PME5325-Fundamentos da Tu... ...cia 2016
Prof. Jayme... Ortiz

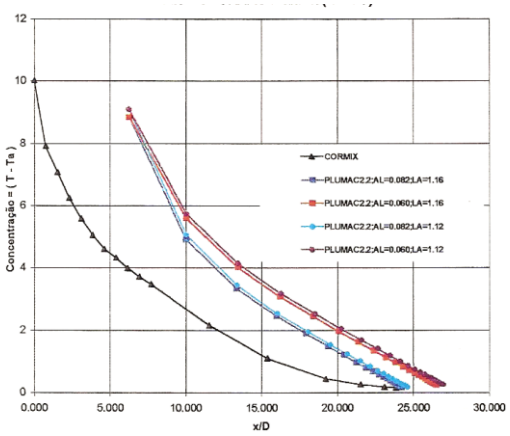


Figura 7.18 Variação da concentração no eixo do jato/pluma, baseada no decaimento da temperatura para Fd_0 = 6 – comparação com a aplicação do CORMIX e do PLUMAC2.2

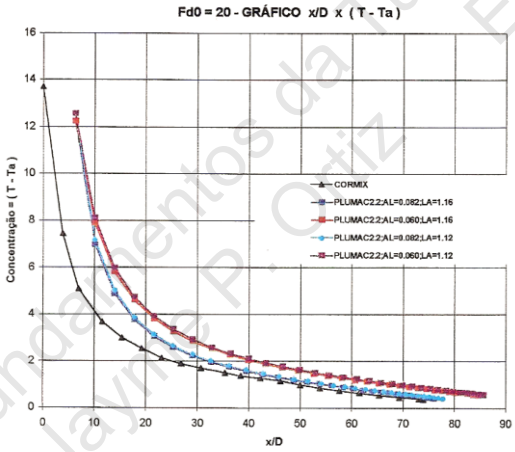


Figura 7.19 Variação da concentração no eixo do jato/pluma, baseada no decaimento da temperatura para Fd_0 = 20 – comparação com a aplicação do CORMIX e do PLUMAC2.2

PME5025-Fundamentos da Turbulência 2016
Prof. Jayme P. Ortiz
EPUSP

O modelo numérico PLUMAC 2.2 foi utilizado para estimar as dimensões de lagoas de resfriamento, tendo-se adotado como dados de entrada os valores abaixo, que foram obtidos a partir de um pesquisa informal relativa às descargas de usinas termelétricas em sistemas abertos:

- Vazão do jato (efluente): $Q = 0{,}05\ m^3/s/MW$
- Diâmetro do conduto: D = 1,0 m
- Temperatura do corpo hídrico: T_a = 21 ºC

- Temperatura do jato na descarga: $T_0 = 31$ ºC

O modelo desenvolvido por Pinheiro (1998) poderia ser aplicado às descargas de efluente aquecido de usinas termelétricas brasileiras em reservatórios de água, de modo a verificar as condições de descarga térmica comparada com as condições estabelecidas pela resolução CONAMA Nº 357.

7.6. Difusão e Advecção de Jatos e Plumas Turbulentas

Os processos de transferência de quantidade de movimento, calor e massa são descritos pelas leis básicas que regem o estudo de fenômenos de transporte, a saber: Lei de Newton da viscosidade, Lei de Fourier e Lei de Fick, respectivamente (ver ROMA, 2006). Nesse item o interesse recai no transporte de massa de uma substância, fenômeno muito importante no estudo de processos de dispersão de efluente, em particular em meio hídrico.

No estudo de difusão de um soluto em um solvente, a grandeza utilizada que mede a quantidade de soluto no solvente é a concentração, definida em um ponto *P* como:

$$C = \left(\frac{dm}{d\forall} \right)_P \qquad (7.35)$$

A transferência de massa de um corante ou traçador através de uma área por unidade de tempo, em uma direção x, é proporcional ao gradiente de concentração do corante ou traçador, naquela direção. Esse conceito é conhecido por Lei de Fick da Difusão que é estabelecida, matematicamente, pela seguinte equação:

$$J = -D \frac{dC}{dx} \qquad (7.36)$$

onde: $D \rightarrow$ coeficiente de difusividade mássica *[L^2/T]*

$J \rightarrow$ vazão em massa por unidade de área [M/T. L^2]

As idéias de Kolmogorov podem ser estendidas, de modo a descrever a mistura turbulenta de um poluente. Muitas vezes estamos interessados na influência de um campo turbulento de velocidades na distribuição de uma quantidade escalar. Essa quantidade escalar é chamada de escalar passivo ou conservativo, quando não ocorre

PME5325-Fundamentos da Turbulência 2016
Prof. Jayme P. Ortiz
EP-USP

decaimento da substância por reações químicas. A maioria dos escalares passivos segue a equação da advecção-difusão abaixo, cuja dedução pode ser vista em Potter & Wiggert (1997).

$$\frac{\partial C}{\partial t} + (V * \nabla)C = D\nabla^2 C \qquad (7.37)$$

Nessa equação, o segundo termo corresponde ao termo advectivo de concentração pelo campo de velocidade e o terceiro termo corresponde ao termo difusivo de concentração. Definindo-se agora o número de Peclet como uma relação entre os processos de advecção e difusão turbulenta, tem-se que:

$$Pe = \frac{ul}{D} \qquad (7.38)$$

Sendo *u* a escala turbulenta de velocidade e *l* a escala de comprimento do turbilhão.

Quando o número de Peclet é alto, caso mais comum no escoamento turbulento, a difusão pode ser desprezada para as maiores escalas. Portanto para: $\frac{ul}{\alpha} >> 1$ e $\frac{ul}{\nu} >> 1$, os efeitos difusivos são restritos às micro-escalas de turbulência.

Davidson (2007) apresenta o estudo da dispersão de escalares passivos a partir da análise de dois problemas:

Problema 1 – Problema de Stokes de difusão a partir de uma partícula

Imagine-se um corante despejado continuamente de uma fonte pontual em um escoamento turbulento. A pergunta que se faz é qual o tamanho, em média da nuvem de corante após um intervalo de tempo *t*, ou, em outras palavras, quanto, em média a partícula fluida migra da fonte no intervalo de tempo *t*. Admitindo-se $Pe = \frac{ul}{\alpha} >> 1$, pois o escoamento é turbulento, o processo de crescimento da pluma de corante está associado às pequenas escalas de turbulência geradas na descarga contínua e pontual do corante.

Problema 2 – Lei de Richardson

Considere-se agora uma nuvem de corante descarregada, num instante *t = 0* em um escoamento turbulento, cuja dimensão inicial é menor que a escala integral, mas maior que a escala de Kolmogorov. O centróide da nuvem se movimentará como no problema 1, e a nuvem se deslocará ao sabor das maiores escalas. Nesse problema o

PME5325-Fundamentos da Turbulência 2016
Prof. Jayme P. Ortiz
EP-USP

que se pretende determinar é a taxa média de separação de duas partículas adjacentes da nuvem, como resultado da mistura turbulenta. Esse problema é conhecido com problema de Richardson ou problema da dispersão relativa de duas partículas.

Na prática, o que ocorre é a superposição dos dois problemas. Se considerarmos partículas do escalar passivo (corante) desigualmente distribuídas em um tanque cheio de água estagnada e submetermos o tanque a uma agitação turbulenta, a água e o corante tendem a se misturar. Todavia, durante os estágios intermediários, a concentração do corante não será uniforme. À medida que o tempo passa, embora uma visão macroscópica tenda a mostrar um campo cada vez mais uniforme de concentrações, ele ainda permanece não uniforme até que as concentrações das finas escalas de mistura tenham erradicado todas as flutuações de concentrações. Uma conveniente medida dessa não uniformidade do corante é dada pela variância das flutuações de concentração, admitindo-se valor médio igual a zero. Davidson (2007) mostra que a taxa de variação da variância é proporcional ao termo difusivo, ou em outras palavras, as flutuações na concentração do corante são destruídas pela difusão:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{1}{2}\overline{C^2}\right) = -D\overline{(\nabla C)^2} \qquad (7.39)$$

ou,

$$\varepsilon_c = D\overline{(\nabla C)^2} \qquad (7.40)$$

Portanto a advecção é necessária para gerar os maiores gradientes de *C* e quando os filamentos de concentração são muito finos, a difusão atua de modo a destruir e erradicar a variância de *C* produzindo a mistura completa nas menores escalas.

Estabelecendo-se uma analogia entre a micro-escala de gradiente de concentração η_c e a micro-escala de comprimento de Kolmogorov η, obtém-se para a taxa de dissipação do gradiente de concentração ε_c:

$$\varepsilon_c = D\left(\frac{\overline{\Delta C_{\eta_c}}}{\eta_c}\right)^2 \qquad (7.41)$$

Sendo: $\overline{\Delta C_{\eta_c}}$ a flutuação característica em *C* em uma distância da ordem de η_c.

PME5305 Fundamentos da Turbulência 2016
Prof. Jayme P. Ortiz EPUSP

Para uma melhor determinação da micro-escala η_c é interessante analisar o número de Schmidt do escoamento que é uma relação entre a viscosidade do fluido e a difusividade mássica *(υ/D).* Quando o número de Schmidt é maio que a unidade $\upsilon > D$, a difusão de *C* é menos efetiva que a difusão da vorticidade e conseqüentemente $\eta_c < \eta$. Nesse caso as lâminas finas do poluente ou corante serão envolvidas pelos vórtices de Kolmogorov. Batchelor define a micro-escala η_c como:

- Para altos valores de números de Schmidt $(\eta_c \prec \eta)$:

$$\eta_c = \left(\frac{D}{\nu}\right)^{1/2} \eta \qquad (7.42\ a)$$

- Para baixos valores de números de Schmidt: $(\eta_c \succ \eta)$:

$$\eta_c = \left(\frac{\alpha}{\nu}\right)^{3/4} \eta \qquad (7.42b)$$

Exemplo:

Em um estudo preliminar de um traçador, Freon-12 é misturado em um laboratório em um reservatório contendo 100 kg de água a 25ºC, devendo-se utilizar um misturador manual com potência de 200 W.

a) Qual é a escala para a qual as flutuações de velocidade serão dissipadas pelo efeito de viscosidade (micro-escala de Kolmogorov)?

b) Qual é a escala para a qual os gradientes de concentração do Freon-12 desaparecerão?

Dados: $\nu_{H_2O} = 0{,}905X10^{-6}\, m^2/s$

$D_{Freon} = 10X10^{-10}\, m^2/s$

a) $\varepsilon = \dfrac{200W}{100kg} = 2W/kg$

$$\eta = \left(\frac{\nu^3}{\varepsilon}\right)^{1/4} = \left[\frac{\left(0{,}905X10^{-6}\right)^3}{2}\right]^{1/4} = 2{,}5X10^{-5}\, m = 25\mu m$$

PME3325-Fundamentos da Turbulência 2016 EPUSP Prof. Jaime R. Ortiz

b) $\frac{\nu_{H_2O}}{D_{Freon}} > 1$ ou $S = \frac{\nu_{H_2o}}{D_{freon}} \cong 900$

Portanto:

$$\eta_c = \left(\frac{D}{\nu}\right)^{1/2} \eta = \left(\frac{D}{\nu}\right)^{1/2} \left(\frac{\nu^3}{\varepsilon}\right)^{1/4} = \left(\frac{D^2\nu}{\varepsilon}\right)^{1/4} = \left(\frac{\left(10X10^{-10}\right)^2 x0{,}905X10^{-6}}{2}\right)^{1/4}$$

$$\eta_c = 8X10^{-7}\, m = 0{,}8\mu m$$

$$\eta_c = 0{,}8\mu m < \eta = 25\mu m\,.$$

Adicionalmente, utilizando-se a decomposição de Reynolds para escoamento turbulento (ver POTTER E WIGGERT, 1997), obtém-se para a equação da advecção-difusão, na direção x a seguinte expressão:

$$\frac{\partial \overline{C}}{\partial t} + U\frac{\partial \overline{C}}{\partial x} = D\frac{\partial^2 \overline{C}}{\partial x^2} - \frac{\partial \overline{uc}}{\partial x} \qquad (7.43)$$

onde $\overline{uc}$ corresponde ao fluxo turbulento médio de um traçador ou corante, cujo gradiente de concentração vale *c*. Esse termo de turbulência adicional pode ser representado pelo gradiente médio do processo de difusão na direção x, estabelecendo-se assim uma analogia com a Lei de Fick, modelando-se o chamado problema de fechamento da turbulência:

$$\overline{uc} = -D_{t_x}\frac{\partial \overline{C}}{\partial x} \qquad (7.44)$$

Substituindo a equação (7.44) na equação (7.43), resulta:

$$\frac{\partial \overline{C}}{\partial t} + U\frac{\partial \overline{C}}{\partial x} = D\frac{\partial^2 \overline{C}}{\partial x^2} + \frac{\partial}{\partial x}\left(D_{t_x}\frac{\partial \overline{C}}{\partial x}\right) \cong D_{t_x}\frac{\partial^2 \overline{C}}{\partial x^2} \qquad (7.45)$$

Essa equação poderia ser estendida para as três dimensões e sua solução é possível aplicando-se técnicas numéricas de dinâmica dos fluidos computacionais. Soluções da equação de transporte unidimensional de difusão-advecção podem ser encontradas em Potter & Wiggert (1997) e são do tipo exponencial, envolvendo o cálculo da função erro *(erf).*

PME5705-Fundamentos da Turbulência 2016 Prof. Jayme E. Ortiz EPUSP

7.7. A Disposição de Efluentes no Mar Através de Descargas Submersas – Emissários Submarinos

Considerando o grande volume de água contido nos oceanos, sua capacidade de diluição é enorme. Como os processos físicos, químicos e biológicos progressivamente se degradam e são assimilados naturalmente pelo meio, pode-se concluir que os oceanos, sob o ponto de vista ambiental, podem ser considerados ideais para receber a descarga de efluentes (exceto aqueles efluentes altamente estáveis, não sujeitos às taxas normais de diluição). Apesar disso, esgoto doméstico ou industrial descarregado nos oceanos com altas concentrações de descarga de poluentes podem causar grande impacto nas regiões de descarga. O projeto adequado da estrutura de descarga acoplado a algum tipo de estação de tratamento em terra é de fundamental importância de modo a garantir a diluição inicial no campo próximo *(near field)* do jato/pluma. Por outro lado, condições ambientais favoráveis são necessárias para assegurar a remoção contínua do efluente descarregado da zona de descarga, com a diluição remanescente nos campos de transição e distante *(far field).* O campo próximo é, portanto, a região próxima da descarga que é dinamicamente afetada pelo projeto da descarga, sendo que a quantidade de movimento e o empuxo da descarga modificam o padrão do escoamento ambiental e a descarga gera seu próprio campo de velocidade média e turbulência. Fenômenos como a difusão do jato e o arraste do fluido adjacente, assim como, a aceleração pelo empuxo e o espalhamento ocorrem no campo próximo e afetam a diluição do poluente. Os campos de transição e distante, por outro lado, correspondem a regiões mais afastadas, nas quais os efeitos dinâmicos de descarga não têm mais influência, e o campo de diluição do efluente é obtido por correntes advectivas ambientais e pela difusão por processos turbulentos ambientais.

PME5025-Fundamentos da Turbulência 2016
Prof. Jaime P. Ortiz EPUSP

7.7.1. Descargas Submersas de Jatos Simples

Descargas submersas de jatos simples são aqui definidas como descargas feitas no fundo do mar através de saída simples (um emissário submarino, por exemplo, descarregando o efluente em seu final através de um único tubo ou saída). Nesse caso é importante conceituar descarga rasa e descarga profunda. Na condição de descarga profunda o jato sobe até a superfície, quando não há estratificação, e a diluição ocorre

devido ao arraste turbulento lateral. Essa é uma condição de estabilidade hidrodinâmica. Na condição de descarga rasa a descarga de quantidade de movimento inicial é suficientemente forte para causar a instabilidade hidrodinâmica do movimento ascendente do jato, criando uma zona de recirculação *(ver figuras 7.20 e 7.21).*

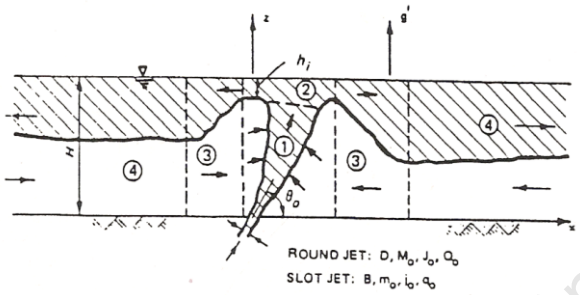


Figura 7.20 Vista esquemática da descarga profunda de um jato, sem estratificação (descarga estável) (1) região do jato submerso sob a ação do empuxo; (2) região em que o jato atinge a superfície livre;(3) região do ressalto hidráulico interno; (4) região de estratificação a partir da superfície (fonte: Jirka, 2001)

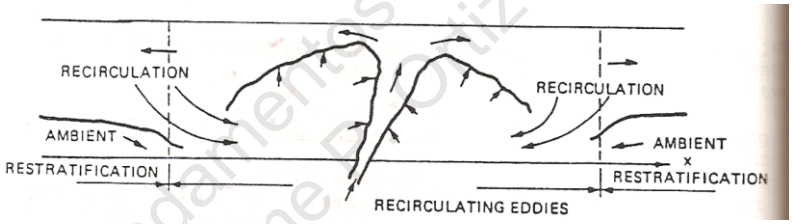


Figura 7.21 Vista esquemática da descarga rasa de um jato, sem estratificação (descarga instável) (fonte: Jirka, 2001)

Normalmente as descargas de esgoto no mar operam como descargas profundas, enquanto que, as descargas de sistemas de resfriamento (usinas termelétricas e termo-nucleares) operam como descargas rasas. É importante enfatizar, que nesses casos, o número de Reynolds na descarga normalmente é superior a 2400, o que caracteriza um escoamento turbulento, e a dinâmica de mistura é governada pelos fluxos de quantidade de movimento e de empuxo na descarga.

$$M_0 = \frac{U_0^2 \pi^2 d_0^2}{4}$$ (fluxo de quantidade de movimento na descarga) (7.46)

$$J_0 = U_0 g' \frac{\pi d_0^2}{4}$$ (fluxo de empuxo na descarga) (7.47)

PME5325-Fundamentos da Turbulência 2016
Prof. Jayme Pinto Ortiz
EPUSP

$$Q_0 = U_0 \frac{\pi d_0^2}{4} \quad \text{(fluxo volumétrico na descarga)} \qquad (7.48)$$

onde $g` = g\ (\Delta\rho_0/\rho_a)$ representa a aceleração da gravidade modificada.

Jirka e Lee (!994) propõem a seguinte condição para descarga profunda:

$$\frac{H}{d_0} > 0{,}22 F_{d_0} \qquad (7.49)$$

sendo: $H \rightarrow$ *profundidade de descarga;*

$d_0 \rightarrow$ *diâmetro do bocal de saída;*

$Fd_0 \rightarrow$ *número de Froude densimétrico na seção de saída.*

Os mesmos Jirka e Lee (1994) propõem uma série de equações empíricas, a serem apresentadas a seguir, para o cálculo da diluição na linha central do jato/pluma nos casos de descargas oceânicas profundas e rasas.

Descarga profunda – pluma vertical – diluição na linha central a uma profundidade z do fundo:

$$S_c = 0{,}11 \left(\frac{z}{D_0} \right)^{5/3} F_{d_0}{}^{-2/3} = \frac{0{,}11 J^{1/3} z^{5/3}}{Q} \qquad (7.50)$$

Descarga profunda – jato horizontal sob a ação de empuxo – diluição na linha central a uma profundidade z do fundo:

$$S_c = 0{,}54 F_{d_0} \left(0{,}38 \frac{z}{d_0 F_{d_0}} + 0{,}66 \right)^{5/3} \quad \text{para: } z/d_0 \geq 0{,}5\ Fd_0 \qquad (7.51)$$

Descarga profunda em ambiente estratificado com estratificação linear:

$$S_c = 0{,}071 \frac{J^{1/3} z_{máx}^{5/3}}{Q} \qquad (7.52)$$

$$z_{máx} = 3{,}98 J^{1/4} \left(-\frac{g}{\rho_a} \frac{d\rho_a}{dz} \right)^{-3/8} \qquad (7.53)$$

Descarga profunda de jato vertical com efeito de corrente ambiental:

PME5325 Fundamentos da Turbulência 2016 Prof. Jayme P. Ortiz EPUSP

- diluição mínima na linha central, com efeito predominante de empuxo no campo próximo:

$$S_c = 0{,}27\frac{J^{1/3}z^{5/3}}{Q} \qquad \text{para: } \frac{zu_a^3}{J} < 1 \tag{7.54}$$

- diluição mínima na linha central, com efeito predominante de empuxo no campo distante:

$$S_c = 0{,}40\frac{u_a z^2}{Q} \quad \text{´para: } \frac{zu_a^3}{J} > 1 \tag{7.55}$$

Descarga profunda de jato horizontal descarregado perpendicularmente a corrente ambiental sem estratificação:

- diluição mínima na superfície livre com efeito predominante de empuxo no campo próximo:

$$S_m = 0{,}31\frac{J^{1/3}H^{5/3}}{Q} \qquad \text{para: } \frac{Hu_a^3}{J} < 5 \tag{7.56}$$

- diluição mínima na superfície livre com efeito predominante de empuxo no campo distante:

$$S_m = 0{,}32\frac{u_a H^2}{Q} \text{ para: } \frac{zu_a^3}{J} > 5 \tag{7.57}$$

Descarga rasa para jato vertical:

$$S_c = 0{,}9\left(\frac{H}{D_0}\right)^{5/3} F_{d_0}{}^{-2/3} \tag{7.58}$$

7.7.2. Descarga Submersa de Jatos de Saídas Múltiplas- Sistemas Difusores de Emissários Submarinos

A descarga de altas vazões de efluentes no mar através de emissários submarinos tem sido recomendada em muitos casos, projetando-se para esses casos, no final dos

PME5325-Fundamentos da Turbulência 2016
Prof. Jayme P. Ortiz
EPUSP

emissários, sistemas difusores de saídas múltiplas. Esses sistemas difusores são estruturas lineares, com um grande número de orifícios montados ou conectados através de *"risers"* a uma tubulação submersa que repousa sobre o fundo do oceano. As saídas podem ser orientadas em diversas direções, tanto em planta como em corte, para melhorar os padrões de mistura e tirar vantagem da direção da corrente ambiental. Portanto o sistema difusor de saídas múltiplas pode se constituir em um eficiente dispositivo de mistura, capaz de diluir rapidamente o efluente dentro de uma distância curta e a literatura propõe uma série de arranjos desses difusores (ver JIRKA e LEE, 1994 e JIRKA, 2001).

Portanto o projeto de um sistema difusor de saídas múltiplas passa pela compreensão do processo de dispersão a partir da descarga simultânea submersa de múltiplos jatos, e, nesse caso, é importante a definição dos seguintes parâmetros geométricos e de fluxo na seção de descarga:

Parâmetro geométrico:

$$B = \frac{\pi d_0^2 / 4}{l} = \frac{\pi d_0^2}{4} x \frac{N}{L_D} = \frac{N \pi d_0^2}{4 L_D} \qquad (7.59)$$

onde: $L_D \rightarrow$ *comprimento do difusor;*

$N \rightarrow$ *número de saídas;*

$l \rightarrow$ *espaçamento entre saídas;*

$B \rightarrow$ *saída equivalente (definido na literatura como "equivalent slot").*

Parâmetros de Fluxo (volumétrico, de quantidade de movimento e de empuxo) por Unidade de Largura do Difusor:

$$q_0 = \frac{Q_0}{L_D} = \frac{N U_0 \pi D_0^2 / 4}{N l} = U_0 B \qquad [L^2/T] \qquad (7.60)$$

$$\dot{m}_0 = \frac{\dot{M}_0}{L_D} = \frac{N U_0^2 \pi D_0^2 / 4}{N l} = U_0 q_0 \quad [L^3/T^2] \qquad (7.61)$$

$$j_0 = \frac{J_0}{L_D} = \frac{N U_0 g' \pi D_0^2 / 4}{N l} = q_0 g' \quad [L^3/T^3] \qquad (7.62)$$

PME3325-Fundamentos da Turbulência 2016 Prof. Jayme P. Ortiz EPUSP

Na instalação de um sistema difusor padrão deve-se esperar as seguintes condições:

- O difusor é longo relativamente à profundidade de água ($L_D/H >> 1$). Em alguns casos esse valor pode ser da ordem de 100.
- O espaçamento médio entre as saídas individuais é pequeno com relação a profundidade ($l/H << 1$).

Sob essas condições, o jato/pluma proveniente da descarga de um sistema difusor pode ser caracterizado por três regiões com diferentes comportamentos hidrodinâmicos (*figura 7.22)* :

- Uma região inicial de escoamento *3D* antes do encontro dos jatos individuais.
- Uma região *2D* formada depois do encontro dos jatos individuais, no caso de descarga profunda, ou após a descontinuidade do jato, no caso de descarga rasa.
- Uma região global *3D* que compreende o escoamento de todo o comprimento do difusor e que corresponde à transição do campo próximo para o campo distante.

Jirka e Lee (1994) propõe o seguinte critério de estabilidade no campo próximo para a descarga submersa de jatos múltiplos sob a ação de empuxo, em ambiente estagnado:

$$\frac{\dot{m}_0}{j_0^{2/3} H} = \frac{0{,}54}{\left(1+\cos^2\theta_0\right)^2} \qquad (7.63)$$

sendo θ_0 o ângulo formado no lançamento com a horizontal.

PME5326 Fundamentos da Turbulência 2016
Prof. Jayme P. Ortiz EPUSP

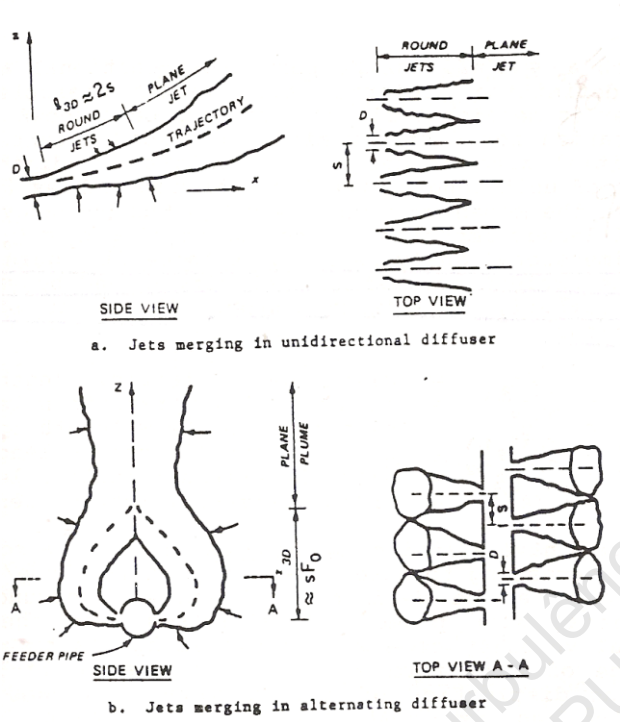


Figura 7.22 Representação esquemática de jatos circulares individuais (3D) convergindo para um jato/pluma bidimensional (fonte: Jirka, 2001)

A diluição do campo de efluente é governada pelo fluxo de empuxo por unidade de comprimento do difusor e pela profundidade de descarga. Inicialmente, o efluente deixa a série de orifícios circulares do sistema difusor e as equações de cálculo de diluição para jatos circulares individuais mencionadas anteriormente, poderiam ser utilizadas. Depois dos jatos/plumas individuais viajarem alguma distância, eles se encontram e passam a ter um comportamento bidimensional.

Jirka e Lee (1994) fazem um resumo das equações empíricas para o cálculo da diluição na linha central do jato/pluma nos casos de descargas oceânicas profundas e rasas de sistemas difusores de múltiplos orifícios. Essas equações estão resumidas a seguir:

PME5025-Fundamentos da Turbulência 2016
Prof. Jaime E. Ortiz
EPUSP

Descarga profunda em ambiente estagnado e sem estratificação:

$$S_c = 0{,}38 \frac{j_0^{1/3} H}{q_0} \qquad (7.64)$$

Descarga profunda para ambiente estagnado com estratificação linear:

$$S_c = 0{,}31 \frac{j_0^{1/3} z_{máx}}{q_0} \tag{7.65}$$

$$z_{máx} = 2{,}84 j_0^{1/3} \left(-\frac{g}{\rho_a} \frac{d\rho_a}{dz} \right)^{-1/2} \tag{7.66}$$

Descarga profunda com corrente ambiental sem estratificação:

Roberts (apud JIRKA e LEE, 1994) estabeleceu um parâmetro de fluxo como função da velocidade de corrente e do fluxo de empuxo unitário:

$$F = \frac{u_a^3}{j_0} \tag{7.67}$$

onde $u_a \rightarrow$ *velocidade ambiental.*

Para $F < 0{,}1$ propõe a seguinte equação:

$$. \; S_c = 0{,}27 \frac{j_0^{1/3} H}{q_0} \tag{7.68}$$

com uma pequena variação da constante comparada com a da equação 7.65.

Para $F > 0{,}1$, todavia, o arraste é dominado pela corrente ambiental e o ângulo de alinhamento γ entre a linha do difusor e a direção da corrente ambiental passa a ser importante. Nesse sentido Roberts, 1979 (apud JIRKA e LEE, 1994) propõe o seguinte gráfico:

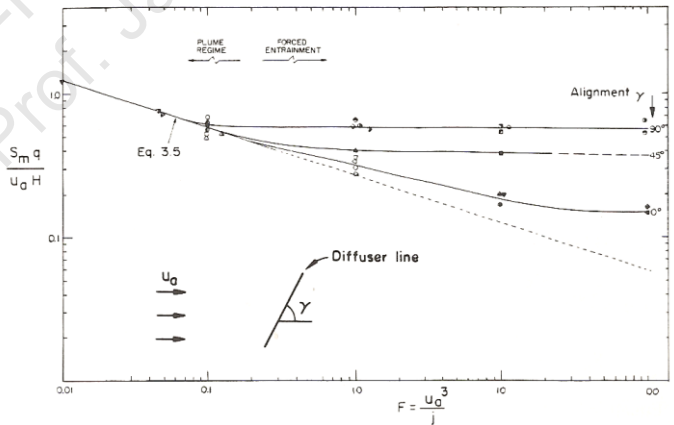


Figura 7.23 Gráfico de diluição mínima na superfície para descarga profunda de sistema difusor com corrente ambiental cruzada, como função do ângulo de alinhamento γ (dados obtidos de estudo em laboratório- Roberts, 1979 – apud JIRKA e LEE, 1994)

PME5325-Fundamentos da Turbulência 2016 Prof. Jayme P. Ortiz EPUSP

Observa-se nesse gráfico que as maiores diluições são obtidas para $\gamma = 90^o$ e as menores diluições para $\gamma = 0^o$. Para F = 100 o alinhamento perpendicular ($\gamma = 90^o$) resulta em uma diluição quatro vezes maior que o alinhamento paralelo ($\gamma = 0^o$).

Descarga profunda com corrente ambiental com estratificação linear:

Roberts (1989) (apud Jirka e Lee, 1994) realizou experimentos em laboratório para a determinação da diluição de descarga profunda com corrente ambiental em ambiente com estratificação linear. Como no caso do ambiente sem estratificação, a máxima diluição é obtida com $\gamma = 90^o$, todavia, comparado com o caso de ausência de estratificação, a diluição é menos sensitiva a orientação do sistema difusor. Para $F < 0{,}1$, o máximo alcance em altura do jato/pluma e a mínima diluição mostraram-se independentes de γ. Para $0{,}1 < F < 100$ o alcance e a diluição mínima, considerando alinhamento perpendicular ($\gamma = 90^o$), são obtidos através das seguintes equações de Roberts, 1989 (apud Jirka e Lee, 1994):

$$z_{máx} = 2{,}5 \frac{j_0^{1/2}}{u_a^{1/2}} \left(-\frac{g}{\rho_1} \frac{d\rho_a}{dz} \right)^{-1/2} \tag{7.69}$$

$$S_m = 0{,}4 \frac{j_0^{1/3} z_{máx} F^{1/6}}{q_0} \left(2{,}19 F^{1/6} - 0{,}52 \right) \tag{7.70}$$

Descarga rasa

No caso de descarga rasa, Jirka & Lee (1994) apresentam o equacionamento a partir da classificação de sistemas difusores, conforme mostrado na figura abaixo:

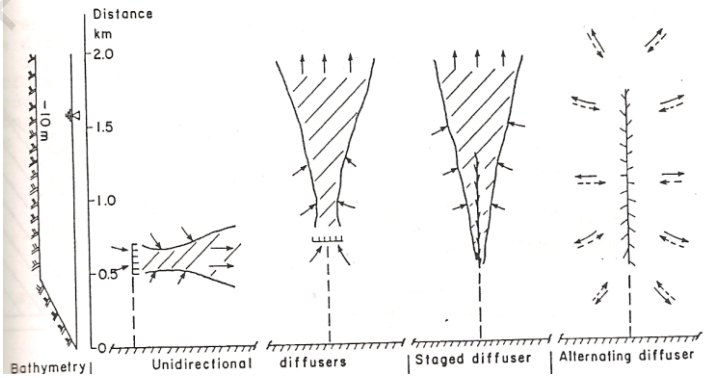


Figura 7.24 Representação esquemática de diferentes sistemas difusores unidirecional, staged e alternado.

PME5325-Fundamentos da Turbulência 2016
Prof. Jayme P. Ortiz
EPUSP

No caso de difusor unidirecional, a diluição média da corrente alinhada com a direção da quantidade de movimento *(bulk dilution)* é dada por Lee e Jirka (1981) e Lee(1985) (apud JIRKA e LEE, 1994), conforme equação a seguir:

$$S = \frac{1}{2}\left[V + \left(V^2 + \frac{2\dot{m}H}{q^2}\right)^{1/2}\right] \qquad (7.71)$$

sendo: $V = \frac{u_a H}{q}$

O difusor unidirecional é efetivo com corrente ambiental na mesma direção, mas a diluição é mais pobre com corrente na direção contrária. Deve ser colocado suficientemente longe da costa, de modo a dispor de espaço suficiente para o arraste do escoamento da parte de trás do difusor.

No caso do difusor tipo *staged* Lee (1980); Almquist & Stolzenbach (1980); Brocard (1980) (apud JIRKA e LEE, 1994) propõem para a determinação da diluição média *(bulk dilution)* a seguinte equação:

$$S = \frac{V}{2} + \left[\left(\frac{V}{2}\right)^2 + 0{,}2\frac{\dot{m}H}{q^2}\right]^{1/2} \qquad (7.72)$$

No caso de ambiente estagnado a equação se reduz para:

$$S = 0{,}45\frac{(\dot{m}H)^{1/2}}{q} \qquad (7.73)$$

Um terceiro tipo de difusor denominado alternado é mostrado na *figura 7.24* e encontrado na literatura e para maiores informações deve-se consultar Jirka e Lee (1994) e Jirka (2001).

7.7.3. O Sistema Especialista *CORMIX*

Conforme já mencionado no item 7.5, a modelagem computacional do jato/pluma, no campo próximo utilizando os chamados métodos integrais que partem de equações diferenciais ordinárias integradas nas seções transversais e adotam distribuição gaussiana nessas mesmas seções, tem sido muita utilizada na literatura, com o desenvolvimento de *softwares* especialistas para a determinação do campo de dispersão das concentrações de um efluente na região do campo próximo. Dentre esses sistemas

PME5825-Fundamentos de Turbulência 2016
Prof. Jayme P. Ortiz
EPUSP

especialistas destaca-se o *CORMIX – The Cornell Mixing Zone Expert System* que é uma ferramenta de simulação e suporte a decisão na avaliação de impacto em zonas de mistura resultante da descarga de efluentes em meio hídrico, aprovada pela *USEPA – Environmental Protection Agency of United States*. O desenvolvimento do *CORMIX* começou em 1986 através de um contrato entre a Cornell University e a USEPA de acordo com Doneker (apud LAMPARELLI E ORTIZ, 2007). Nasceu como *software* livre tendo sido implementado através de duas linguagens de programação: *VP-EXPERT:* que é uma linguagem de programação de sistemas especialistas, utilizada para aquisição das informações, determinação das escalas de comprimento, cálculo das variáveis dinâmicas, seleção do modelo, interpretação dos resultados; *FORTRAN:* utilizada para a simulação hidrodinâmica do escoamento que é utilizada a partir de uma base de dados de conhecimento do programa. A versão atual é comercial e incorpora novas linguagens de programação, como C^{++} e novos recursos para processamento e visualização (ver http://www.cormix.info/) e sua gestão está sob a responsabilidade do Prof. Robert Doneker da *Portland State University – USA.*

PME 5025-Fundamentos da Turbulência 2016
Prof. Jayme P. Ortiz
EPUSP

A dinâmica e a trajetória do jato/pluma – escalas de comprimento e classificação de escoamento

Os três principais módulos disponíveis para a aplicação do *CORMIX* são os seguintes:

- *CORMIX 1:* aplicado à descargas submersas de saída simples (single port – DONEKER e JIRKA, 1990);
- *CORMIX 2:* aplicado à descargas submersas de saídas múltiplas (multiport – AKAR e JIRKA, 1991);
- *CORMIX 3:* aplicado à descarga superficial (JONES et al, 1996).

No trabalho aqui apresentado o interesse restringe-se à descarga submersa. A partir da análise dimensional é possível estabelecer relações de escala que são úteis na classificação dos escoamentos provenientes da descarga de jatos simples ou múltiplos, considerando diversas condições de contorno, tais como: ambiente estagnado, corrente ambiental, ambiente sem ou com estratificação etc. Essas relações de escala foram sumarizadas em Fischer et al (1979) e modificadas por Jirka e Akar (1991) e Jirka e

Doneker (1991), tendo sido incorporadas ao *CORMIX* para a classificação do escoamento e estão descritas a seguir:

- escala de comprimento transição jato/pluma : representa a distância na qual a transição do comportamento de jato para pluma ocorre em um ambiente uniforme estagnado.

$$L_M = \frac{\dot{M}_0^{3/4}}{J_0^{1/2}} \quad \text{(jato circular)} \qquad (7.74)$$

$$l_M = \frac{\dot{m}_0}{j_0^{2/3}} \quad \text{(jato plano equivalente)} \qquad (7.75)$$

- escala de comprimento jato/corrente cruzada: representa a distância que um jato penetra em uma corrente ambiental cruzada até ser desviado por advecção pela corrente.

$$L_m = \frac{\dot{M}_0^{1/2}}{u_a} \quad \text{(jato circular)} \qquad (7.76)$$

$$l_m = \frac{\dot{m}_0}{u_a^2} \quad \text{(jato plano equivalente)} \qquad (7.77)$$

- escala de comprimento pluma/corrente cruzada: representa a distância em que uma pluma vertical penetra em uma corrente ambiental cruzada até ser desviada por advecção pela corrente.

$$L_b = \frac{J_0}{u_a^3} \quad \text{(jato circular)} \qquad (7.78)$$

- escala de comprimento jato/estratificação: representa a distância em que um jato torna-se fortemente afetado pela estratificação dando origem a uma camada terminal que se espalha horizontalmente em um ambiente estratificado linearmente.

$$L'_m = \frac{\dot{M}_0^{1/4}}{\varepsilon^{1/4}} \quad \text{(jato/pluma circular)} \qquad (7.79)$$

$$l'_m = \frac{\dot{m}_0^{1/3}}{\varepsilon^{1/3}} \quad \text{(jato/pluma plano equivalente)} \qquad (7.80)$$

- escala de comprimento pluma/estratificação: representa a distância em que uma pluma torna-se fortemente afetada pela estratificação dando origem a uma camada terminal que se espalha horizontalmente em um ambiente estratificado linearmente.

PME5025-Fundamentos da Turbulência 2016
Prof. Jayme P. Ortiz
EPUSP

$$L_b^{'} = \frac{M_0^{1/4}}{\varepsilon^{3/8}} \text{ (jato/pluma circular)}$$

$$l_b^{'} = \frac{j_0^{1/3}}{\varepsilon^{1/2}} \text{ (jato/pluma plano equivalente)} \qquad (7.81)$$

- escala de comprimento corrente cruzada/estratificação: representa os pesos relativos em que a corrente ambiental e a estratificação afetam a trajetória da pluma vertical.

$$l_a = \frac{u_a}{\varepsilon^{1/2}} \text{ (pluma plana equivalente)} \qquad (7.82)$$

- escala de comprimento de descarga: representa a região sobre a qual a geometria de descarga tem uma forte influência sobre o escoamento.

$$l_q = \frac{q_0^2}{m_0} \qquad (7.83)$$

Na aplicação do *CORMIX* pedem-se como parâmetros de entrada, os parâmetros geométricos, os parâmetros de descarga, os parâmetros ambientais e os critérios regulatórios, relativos à diluição na zona de mistura, de acordo com a legislação vigente. O sistema de *software* verifica a coerência dos dados e executa a simulação hidrodinâmica com a interpretação dos resultados nos campos próximo e de transição, em termos dos critérios ambientais estabelecidos, sugerindo alternativas e rotas para a otimização do processo de diluição.

O coração do *CORMIX* é o sistema de classificação que distingue cuidadosamente os diversos padrões de descarga de efluentes. Segundo Doneker (ver LAMPARELLI & ORTIZ, 2007) a versão mais recente do *CORMIX* contém em torno de 80 tipos de classificação de escoamento para descarga submersa de saída simples, descarga submersa de saídas múltiplas e descarga superficial. A *figura 7.25* mostra essa classificação paara descarga submersa de saída simples.

PME5293 Fundamentos da Turbulência 2016 EPUSP Prof. Jayme P. Ortiz

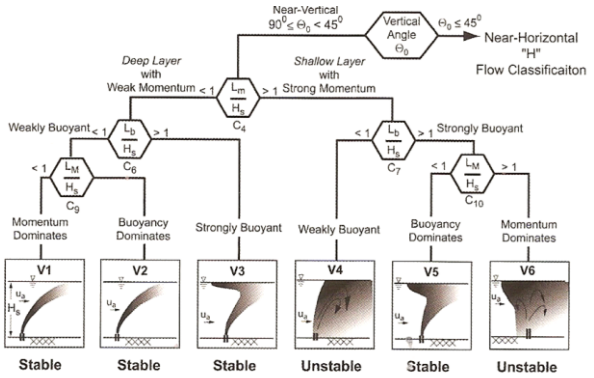


Figura 7.25 Classificação de fluxo do CORMIX 1 – descarga submersa vertical de saída única em um ambiente sem estratificação (corresponde a classificação "V" do CORMIX) – Fonte: Lamparelli & Ortiz (2007)

7.7.4. O Conceito de Zona de Mistura

Normalmente, no gerenciamento de qualidade da água é necessário que a fonte de descarga do efluente seja regulada através das concentrações limites na saída da tubulação *(end of pipe)*, acompanhando-se, a partir desse ponto, a diluição ao longo de uma zona de mistura. Essa abordagem reconhece a capacidade natural assimilativa do corpo d'água para tratar poluentes de uma maneira economicamente eficiente. Nos Estados Unidos esse conceito está associado ao que se denomina *Regulatory Mixing Zone (RMZ)*, ou, mais restritivamente, *Toxic Mixing Zone (TMZ)*, para descargas tóxicas. Dentro da *RMZ ou da TMZ* os critérios numéricos de qualidade de água podem ser excedidos, desde que o corpo d'água como um todo não seja prejudicado, embora esse conceito possa mudar de estado para estado norte americano.

No Brasil, pode-se dizer que o conceito de zona de mistura foi admitido em 17 de março de 2005 com a aprovação da nova Resolução CONAMA N°357, que regula os padrões de classes de meios hídricos e os padrões de balneabilidade, revogando-se a antiga Resolução CONAMA Nº20. A nova resolução introduziu, pela primeira vez, o conceito de zona de mistura (Art. 2°, XXXVIII – "*zona de mistura: região do corpo receptor onde ocorre a diluição inicial de um efluente*"), e conforme o Art.33: "*Na zona de mistura de efluentes, o órgão ambiental competente poderá autorizar, levando*

PME5325 Fundamentos de Turbulência 2016 Prof. Jayme P. Ortiz EPUSP

em conta o tipo de substância, valores em desacordo com os estabelecidos para a respectiva classe de enquadramento, desde que não comprometam os usos previstos para o corpo d´água". A mesma Resolução complementa a seguir, em parágrafo único: *"A extensão e as concentrações de substâncias na zona de mistura deverão ser objeto de estudo, nos termos determinados pelo órgão ambiental competente, às espensas do empreendedor responsável pelo lançamento"*.O conceito de zona de mistura introduzido na Resolução N°357 mostra uma evolução na interpretação e maior flexibilidade das condições do padrão de lançamento, mas por outro lado, pressupõe uma maior preocupação tecnológica das empresas públicas e privadas, no sentido de quantificar as concentrações de seus efluentes nessa região. Mais recentemente a Resolução CONAMA N°430, de 13 de maio de 2011, que dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementou e alterou a resolução N°357, estabelecendo critérios mínimos para tratamento prévio em sistemas de disposição oceânica.

Portanto a definição de zona de mistura é uma somatório de requisitos regulatórios, de processos hidrodinâmicos, de impactos biológicos e até mesmo de negociação entre as partes, não sendo possível esperar uma definição matemática precisa para todos os ambientes. Doneker (2007) propõe na tabela abaixo, alguns critérios de orientação para a definição de zona de mistura, englobando os requisitos acima recomendados.

Tabela 7.2 Definições de zona de mistura – Doneker, 2007 (Fonte: LAMPARELLI & ORTIZ, 2007)

Mixing Region	Definition	Description	Space/Time Scales Meters/Seconds
Initial Mixing - Zone of Initial Mixing (ZID)	Hydrodynamic	Buoyant jet mixing/turbulent entrainment before any boundary interaction occurs	10^0-10^2/10^0-10^2
Near-field Mixing	Hydrodynamic	buoyant jet mixing up to and including boundary interaction with surface, bottom, or stratified terminal layer	10^0-10^2/10^0-10^2
Far-field Mixing	Hydrodynamic	gravitationally-driven density current mixing (buoyant spreading) and passive diffusion controlled by ambient turbulence which occurs after boundary interaction	10^1-10^5/10^2-10^5
Regulatory Mixing Zone (RMZ)	Regulatory/ Biological/ Chronic Exposure	Can be located in near-field or far-field	10^1-10^2/10^0-10^4
Toxic Dilution Zone (TDZ)	Regulatory/ Biological/ Acute Exposure	Usually located in the near-field	10^0-10^2/10^0-10^2

PME5325-Fundamentos da Turbulência 2016 Prof. Jayme P. Ortiz EPUSP

7.7.5. Sistematização dos Projetos de Emissários Submarinos da SABESP e Avaliação de Desempenho Através do Modelo Computacional *CORMIX*

Marcellino (2000) realizou em seu trabalho de mestrado, um levantamento completo dos dados de emissários submarinos para a disposição oceânica de esgoto doméstico operados pela SABESP – Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo, caracterizando esses emissários em termos de sua localização, população servida, existência ou não de estação de pré-condicionamento de esgoto, vazões máxima e mínima, extensão, diâmetro, espessura, profundidade de lançamento, espaçamento e diâmetro de difusores etc. Nesse trabalho foram caracterizados os sete emissários operados pela SABESP, a saber: Emissário da Praia do Forte (Praia Grande – Subsistema I), Emissário da Vila Tupi (Praia Grande – Subsistema II), Emissário de Santos / São Vicente (Praia José Menino), Emissário de Guarujá (Praia da Enseada), Emissário de São Sebastião (Praia das Cigarras), Emissário de São Sebastião (Ponta do Araçá), Emissário de Ilha Bela (Saco da Capela). Marcellino (2000) utilizou o *CORMIX*, para as simulações das diluições no campo próximo das concentrações de coliformes fecais, fazendo, portanto, um diagnóstico comparativo da operação desses emissários para as condições de projeto e verificando o atendimento à legislação ambiental com base na resolução CONAMA N°20, vigente na época.

7.7.5.1. A Disposição Oceânica Através de Emissários Submarinos no Litoral Paulista

O Brasil com seus 8500 km de costa possui suas maiores concentrações urbanas juntas ou próximas ao oceano, sendo, portanto, as regiões que mais geram e dispõem cargas poluidoras no meio ambiente (OCCHIPINTI, 1973).

Até bem pouco tempo, o oceano era considerado por muitos como o corpo receptor ideal por sua capacidade julgada infinita de assimilar os resíduos das atividades humanas de qualquer natureza. Esse conceito, no entanto, tem mudado nos últimos anos. Os desastres provocados à fauna e flora marinhas, pelos derrames acidentais de petróleo no golfo do México e nas costas da Normandia, as contaminações radioativas em grandes áreas do oceano Pacífico após experiências atômicas, as consequências calamitosas dos derrames de mercúrio na baía de Minamata vieram, dentre outros

PME5325-Fundamentos da Turbulência 2016
Prof. Jayme D. Ortiz - EPUSP

exemplos, mostrar ao mundo a fragilidade da tese de capacidade infinita desse corpo receptor. Da mesma forma, no Brasil a degradação ambiental em ambientes costeiros vem ocorrendo, principalmente pela falta de uma política de planejamento da ocupação urbana no litoral. Ocupações em áreas de proteção ambiental e loteamentos clandestinos em muitas regiões vêm ocorrendo em zonas de periferia dos municípios costeiros, os quais aliados ao aporte de cargas industriais e difusas incrementam a quantidade de cargas poluidoras em estuários, baías e praias.

Apesar da crescente geração de poluentes em regiões litorâneas, da limitação de recursos financeiros e da falta de uma política de saneamento à nível nacional, esforços têm sido feitos para reduzir a carga de esgotos destinadas ao mar. Estudos mais detalhados sobre os aspectos físicos, químicos, biológicos e sanitários dos corpos receptores tem sido conduzidos, tendo-se verificado as condições de assimilação das águas costeiras com relação ao recebimento dos esgotos nas principais cidades do litoral brasileiro. Esses estudos mostram que a utilização da disposição oceânica dos esgotos através de emissários submarinos acoplados a estações de tratamento em terra, particularmente nas grandes cidades litorâneas, como Rio de Janeiro, Salvador, Fortaleza e Santos, é uma solução bastante competitiva de tratamento, desde que convenientemente projetados, operados e monitorados durante sua vida útil. No entanto, o baixo índice de coleta de esgotos em algumas localidades, a falta de ligações de redes de esgoto aos coletores e as ligações clandestinas em canais tem contribuído bastante para que a recuperação da qualidade das águas costeiras ainda não seja a desejável. No litoral paulista, apesar do grande investimento em coleta e tratamento de esgoto nos municípios, somente a cidade de Santos possui um índice de atendimento por coleta e tratamento de esgotos próximo de 100%, como mostrado na Tabela 7.3.

PME5025-Fundamentos da Turbulência 2016
Prof. Jaime P. Ortiz
EPUSP

Tabela 7.3 - Índice de atendimento por coleta e tratamento de esgoto:evolução do índice de atendimento

Município	**Atendimento por coleta e tratamento (cenário anterior)**	**Atendimento por coleta e tratamento (cenário até 2012 incluindo a 1°Etapa do programa Onda Limpa)**
Praia Grande	46%	67%
São Vicente	61%	75%
Santos	96%	97%
Mongaguá	21%	74%
Guarujá	57%	74%
Itanhaém	11%	31%
Peruibe	17%	71%
Cubatão	31%	51%
Bertioga	28%	35%
São Sebastião	44%	76%
Caraguatatuba	35%	78%
Ubatuba	28%	60%
Ilhabela	4%	62%

Fontes: - Relatório Gestão Empresarial da SABESP/julho 1999;

- Estimativa feita pela CG/SABESP, tratamento em estações de pré-condicionamento e disposição oceânica;
- Informações SABESP – Programa Onda Limpa.

PME5526-Fundamentos da Turbulência 2016 Prof. Jayme P. Ortiz EPUSP

No caso dos municípios da baixada santista, há uma grande quantidade de carga poluidora nos efluentes dos canais que drenam as águas pluviais para as praias, onde a frequência de banhistas é muito grande. Para minimizar esse impacto, a SABESP tem adotado nesses municípios a coleta também das águas dos canais para serem tratadas em conjunto com os esgotos nas estações de pré-condicionamento. Essa condição atípica contribui de certa forma para uma diluição prévia (embora bastante variável) do esgoto a ser disposto nos emissários submarinos.

7.7.5.2. Caracterização de Projeto dos Emissários Submarinos da SABESP

A Tabela 7.4 extraída de Marcellino e Ortiz (2001), apresenta as principais características geométricas de projeto dos emissários da SABESP em operação. O mais antigo em operação é o de Santos, desde 1978, e foi construído através da "operação puxamento", um método que demandou grande trabalho e exigiu uma área bastante grande para a plataforma onde ficavam os tramos da tubulação em aço. Na *figura 7.26* está representada a localização do emissário de Santos, assim como o projeto original do sistema difusor, com *risers* com saídas de 30 cm de diâmetro, espaçados de cinco em cinco metros.

O emissário do Guarujá, em operação desde 1998, foi construído em PEAD – Polietileno de Alta Densidade, para substituir o emissário anterior danificado. Nas *figuras 7.27 e 7.28* estão representados, respectivamente, a localização dos emissários da Praia Grande (subsistemas I e II) e o modelo em escala real da tubulação do sistema difusor (com bloco de ancoragem) em PEAD com *riser* e orifícios laterais de 7 cm cada, utilizado no emissário de Guarujá. Verifica-se, portanto, nos emissários mais novos a tendência de utilização de tubulações de PEAD *(ver figura 7.29)* e de utilização de orifícios de menor diâmetro na descarga, com maior número de saídas, o que aumenta a diluição inicial.

PME5325-Fundamentos da Turbulência 2016
Prof. Jayme P. Ortiz - EPUSP

Tabela 7.4 - Resumo Geral das Características Geométricas de Projeto dos Emissários Submarinos da SABESP

Município	Localização	População Máxima (hab)	Vazão máxima (m³/s)	Extensão emissário (m)	Diâmetro (m)	Espessura (mm)	Prof. (m)	Material	Extensão difusor (m)	Nº de bocais difusores	Espaçam difusores (m)	Diâmetro difusores (cm)	Assentam. emissário	Fixação emissário
Praia Grande	Praia do Forte	253.755	1,041	3.300	1,00	38,5	12,5	PEAD	435	174	2,50	6,5 + 13(final)	flutuação e puxamento	blocos de ancoragem
Praia Grande	V.Tupi	348.635	1,361	3.415	1,00	38,5	13	PEAD	570	228	2,50	6,5 + 13(final)	flutuação e puxamento	blocos de ancoragem
Santos	José Menino	1.322.100	7,267	4.000	1,75	19,0	10	aço (revest. concr. 23 mm)	200	40	5,00	30	"pulling" puxamento pelo fundo	enterrado
Guarujá	Praia da Enseada	445.858	1,447	4.500	0,90	34,7	14	PEAD	300	150 (2 por riser)	4,00	6,0	flutuação e puxamento	blocos de ancoragem
São Sebastião	Praia das Cigarras	1.600	0,0116	1.068	0,16	—	8,5	PEAD	3,5	7	0,50	5,0	flutuação e puxamento	blocos de ancoragem
São Sebastião	Araçá	21.396	0,140	1.061	0,40	12,4	8	PEAD	10,1	17	0,60	7,5	flutuação e puxamento	blocos de ancoragem
Ilha Bela	Saco da Capela	4.848	0,030	220	0,25	22,8	24	PEAD	2,5	24	0,20	5,0	flutuação e puxamento	blocos de ancoragem

Observação: emissário do Saco da Capela desativado.

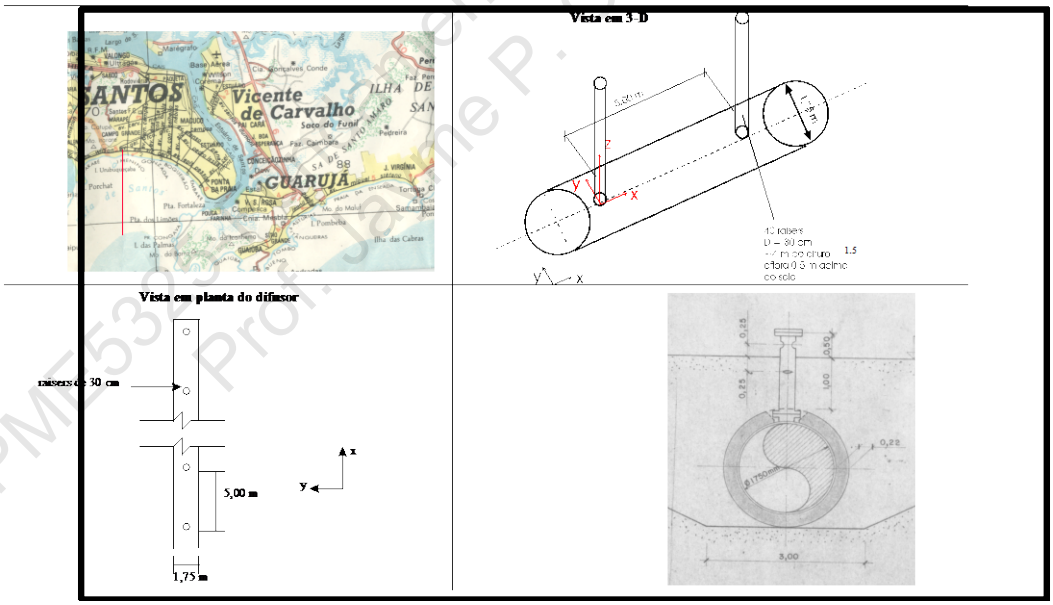


Figura 7.26 Localização e detalhamento do emissário submarino de Santos (projeto)

PME5390 - Fundamentos da Turbulência 2016 Prof. Jaime P. Ortiz EPUSP

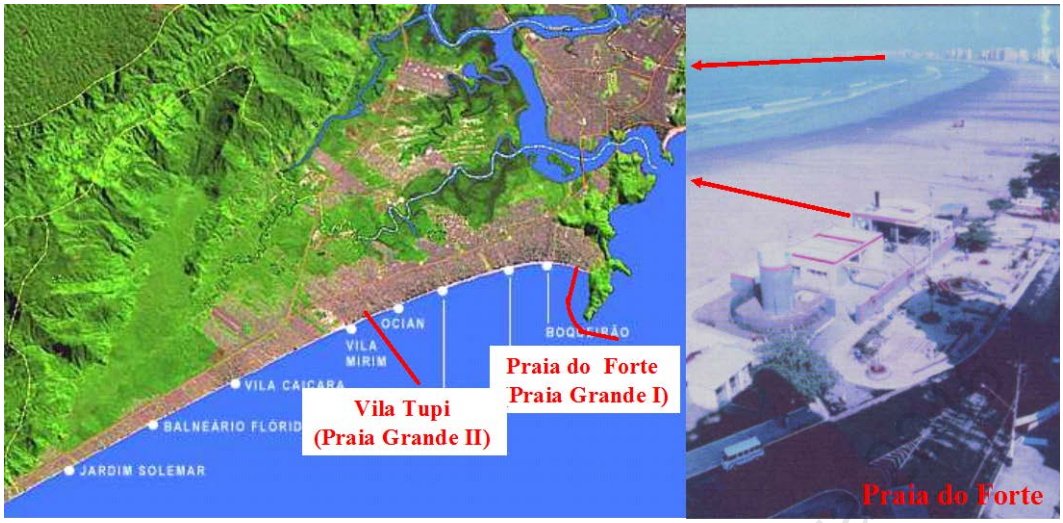


Figura 7.27 Localização dos Emissários da Praia Grande

PME5325-Fund
Prof.
da Turbulência
EPUSP

Figura 7.28 Modelo da tubulação do sistema difusor (com bloco de ancoragem) com riser e orifícios

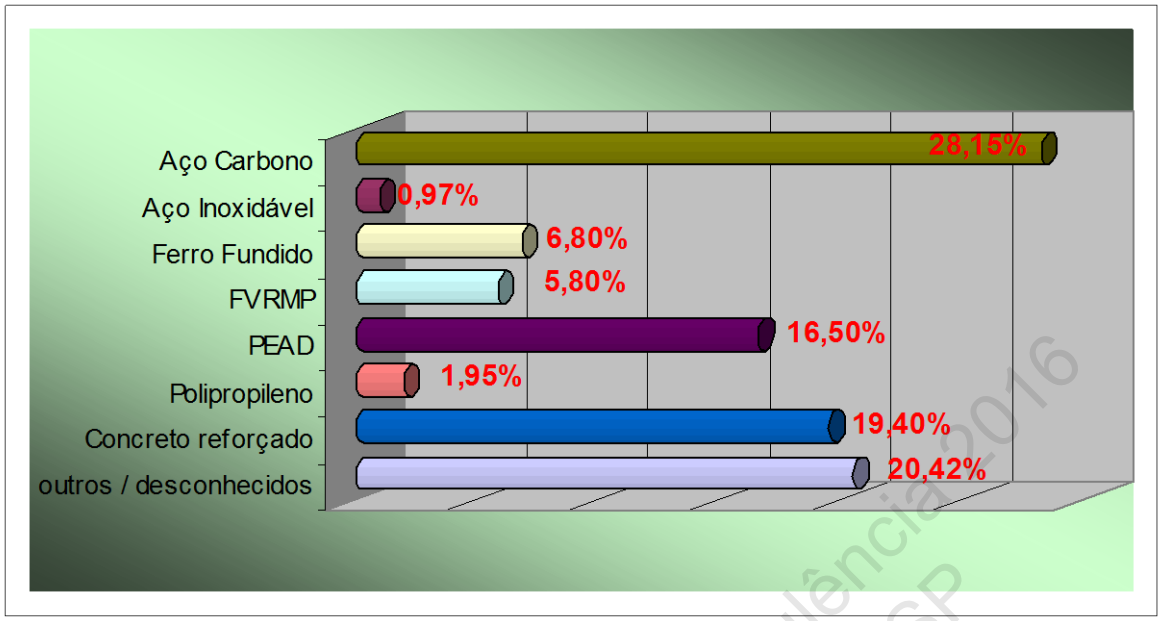


Figura.7 29 Emissários Submarinos por tipo de material de construção. Fonte: Instituto de Hidromecânica da Universidade de Karlsruhe (IFH, 2002)

A Tabela 7.8, extraída de Marcellino e Ortiz (2001), apresenta as características ambientais e dos efluentes pré-condicionados considerados nesse estudo. A SABESP adota como padrão em seus sistemas de disposição oceânica tratamento preliminar antes do lançamento o que inclui gradeamento, peneiramento e, eventualmente, caixa de areia e cloração.

Tabela 7.5 - Resumo Geral das Características Ambientais e do Efluente nos locais de Lançamento dos Emissários Submarinos da SABESP

Município	Localização	Velocidade do vento em direção à praia (m/s) [1]	Velocidade máxima da corrente em direção à praia (cm/s)	T90 (h) [2]	Estrutura vertical	Coeficiente de atrito Darcy-Weisbach (f)	Tipo de pré-tratamento nas Estações de Pré-condicionamento [3]	Concentração colifórmica na saída dos difusores (NMP/100 mL)
Praia Grande	Praia do Forte	2	45	2	estratificado linear em 20% do tempo com diferença de densidade entre o fundo e a superfície de 2 kg/m^3	0,0304	gradeamento, desarenação, peneiras rotativas (25% remoção de coliformes) e desinfecção (98% de remoção de coliformes)	4,5 . 10^6
Praia Grande	V.Tupi	2	45	2	estratificado linear em 20% do tempo com diferença de densidade entre o fundo e a superfície de 2 kg/m^3	0,0301	gradeamento, desarenação, peneiras rotativas (25% remoção de coliformes) e desinfecção (98% de remoção de coliformes)	4,5 . 10^6
Santos	José Menino	2	40	2	estratificado com picnoclina de 2 kg/m^3 na altura de 7,5 m ou transição em 90% do tempo	0,0328	gradeamento, desarenação, peneiras rotativas (25% remoção de coliformes) e desinfecção (98% de remoção de coliformes)	4,5 . 10^6
Guarujá	Praia da Enseada	2	25	2	estratificado linear com diferença de densidade entre o fundo e a superfície de 2 kg/m^3	0,0293	gradeamento, desarenação, peneiras rotativas (25% remoção de coliformes) e desinfecção (98% de remoção de coliformes)	1,5 . 10^7 [4]
São Sebastião	Praia das Cigarras	2	20	1,5	estratificado linear com diferença de densidade entre o fundo e a superfície de 2 kg/m^3	0,0346	gradeamento (10% de remoção de coliformes) e desinfecção (98% de remoção de coliformes)	5,4 . 10^6
São Sebastião	Araçá	2	30	1,5	estratificado linear com diferença de densidade entre o fundo e a superfície de 2 kg/m^3	0,0353	gradeamento, peneiras estáticas (20% de remoção) e desinfecção (98% de remoção de coliformes)	4,8 . 10^6
Ilha Bela	Saco da Capela	2	30	2	estratificado linear com diferença de densidade entre o fundo e a superfície de 2 kg/m^3	0,0245	gradeamento e peneiras estáticas (20% de remoção) e desinfecção (98% de remoção de coliformes)	4,8 . 10^6

PME5025-Fundamentos da Turbulência 2016
Prof. Jayme P. Ortiz
EPUSP

7.7.5.3. A Modelagem do Processo de Dispersão a partir da Utilização das Fórmulas da Literatura e da Aplicação do *CORMIX*

De uma maneira geral, a literatura estabelece que o processo de diluição do jato/pluma de esgoto no mar, no caso de efluente não conservativo, em particular de coliforme, pode ser dividido em três fases: a diluição inicial, a misturação oceânica e o decaimento bacteriano.

- A diluição inicial é influenciada predominantemente pelo projeto do sistema difusor e pelas condições ambientais e de descarga, e foi fartamente discutida nos itens anteriores, com apresentação de diversas fórmulas empíricas da literatura e dos modelos computacionais baseados no método integral, como é o caso do *CORMIX*, que é uma excelente ferramenta de custo baixo para a determinação da diluição inicial em primeira aproximação.
- A misturação oceânica ocorre a partir do final do campo próximo, quando o projeto do sistema difusor deixa de influir na diluição e a diluição subseqüente ocorre devido às condições de turbulência ambiental acarretada pelas condições de velocidade de corrente, vento, fronteiras etc. As diluições, nesses casos, são muito mais lentas do que as diluições iniciais.
- O decaimento bacteriano ocorre devido ao comportamento não conservativo do componente do efluente, destacando-se, nesse caso, os coliformes, normalmente utilizados como traçadores para avaliar a eficiência do processo de dispersão de esgoto sanitário no mar.

PME5325-Fundamentos da Turbulência 2016
Prof. Jayme P. Ortiz
EPUSP

Estabelecendo-se a concentração padrão admissível de coliformes no limite das áreas a preservar e a redução por tratamento e desinfecção em terra, a diluição total, de acordo com a literatura, segue o seguinte modelo matemático de simulação (GONÇALVES E SOUZA, 1997, MARCELLINO, 2000):

$$S = \frac{C_p}{C_e} = S_t * S_0 * S_m * S_{db} \qquad (7.81)$$

onde: $S_t \rightarrow$ diluição por tratamento e desinfecção e que corresponde a relação entre a concentração de esgoto bruto C_b e a concentração de esgoto no lançamento do emissário submarino C_0;

$S_0 \rightarrow$ diluição inicial e que corresponde a relação entre a concentração C_0 na descarga e a concentração no final do campo próximo C_{cp};

$S_m \rightarrow$ diluição por misturação oceânica que depende da capacidade de dispersão oceanográfica com influência no processo de difusão e advecção turbulenta devido a influência de diversos fatores ambientais. Marcellino (2000) utilizou a aproximação de Brooks (1960) para a obtenção da dispersão horizontal da pluma, conforme modelo experimental (*ver GONÇALVES E SOUZA, 1997*):

$$S_m = \frac{C_{cp}}{C_t} = \frac{1}{erf\left(1{,}5/\{[1+\left(8aT/b^{2/3}\right)]^3 - 1\}\right)^{1/2}} \qquad (7.82)$$

onde: a $\rightarrow$ coeficiente de difusividade;

T $\rightarrow$ tempo de percurso no campo do esgoto (h);

b $\rightarrow$ largura inicial do campo (m);

$C_t \rightarrow$ concentração de coliformes após um tempo de percurso *t;*

erf x $\rightarrow$ função erro.

A dispersão horizontal pode ser calculada também, utilizando-se diretamente o diagrama de Brooks apresentado na literatura.

$S_{db} \rightarrow$ diluição por decaimento bacteriano, obtida através da fórmula de Chick (ver GONÇALVES E SOUZA, 1997), a saber:

$$S_{db} = \frac{C_t}{C_0} = 10^{-t/T90} \qquad (7.83)$$

onde: $t \rightarrow$ tempo de percurso (h);

T90 $\rightarrow$ taxa de decaimento bacteriano definida como o intervalo de tempo necessário para o desaparecimento de 90% dos organismos coliformes restantes.

A equação 7.81, utilizada no trabalho de Marcellino (2000), deve ser vista com alguma reserva. No entanto, o cálculo da diluição inicial é sempre recomendável a partir da aplicação das equações apresentadas nos itens 7.1 e 7.2, ou da aplicação de um modelo de pluma gaussiana, como é o caso do CORMIX, para um prognóstico no campo próximo.

PME3325-Fundamentos da Turbulência 2016 Prof. Jayme P. Ortiz EPUSP

7.7.5.4. Resultados do Trabalho de Marcellino (2000)

Os resultados de diagnóstico de eficiência dos emissários de Praia Grande (subsistema 1), Santos e Ilha Bela para condições de projeto, no que se refere à diluição do jato/pluma, baseada no decaimento da concentração de coliformes, estão apresentados resumidamente, a seguir. Os resultados relativos aos demais emissários da SABESP podem ser encontrados em Marcellino (2000).

Emissário Submarino da Praia Grande – Subsistema I

Cenário 1 A: Corresponde a situação de final de plano do emissário, considerando a vazão de projeto de 1,041 m^3/s e os 175 orifícios de saída funcionando como um difusor alternado (aplicação do *CORMIX 2)*. Essa análise foi feita considerando a estação de Pré-Condicionamento (EPC) promovendo uma redução por tratamento/desinfecção de coliformes fecais de 3 x 10^8 NMP/100mL para 4,5 x 10^6 NMP/100mL. A velocidade de corrente convergente a costa foi considerada uniforme de 0,45 m/s, admitindo-se regime permanente e sem influência de maré. Considerou-se perfil de densidade linearmente estratificado, com diferença de massa específica de 2 kg/m^3 entre a superfície e o fundo. A configuração da pluma oriunda dessas condições mostra que ela fica confinada em uma altura terminal de equilíbrio de 3,15 m e, após a zona de confinamento, sofre a ação do espalhamento "boiante" devido à ação advectiva da corrente. A diluição inicial encontrada até a altura terminal foi $S_0 = 117{,}1$. A diluição complementar devido ao espalhamento "boiante" e a ação advectiva foi $S_m = 7{,}24$. A diluição devido ao decaimento bacteriano, aplicando-se a lei de Chick e considerando T90 = 2h, corresponde a $S_{db} = 7{,}22$. Portanto a redução total após o tratamento/desinfecção em terra vale: $S = 117{,}1 * 7{,}24 * 7{,}22 \cong 6121$. Portanto a concentração no limite da zona de proteção é dada por: $C = \frac{C_0}{6121} = \frac{4{,}5x10^6}{6120} \cong 735 NMP/100mL < 1000 NMP/100mL$, satisfazendo portanto a condição de balneabilidade.

Cenário 1B: segue as mesmas características do cenário 1 B, com a única diferença de que não ocorre estratificação de densidade na coluna vertical.Nesse caso a

PME 5025 Fundamentos da Turbulência 2016 Prof. Jayme P. Ortiz EPUSP

pluma atinge a superfície livre já no campo próximo (profundidade de 12,5 m), com diluição inicial $S_0 = 741$. A diluição complementar e a diluição por decaimento bacteriano corresponderam a $S_m = 3{,}49$ e $S_{db} = 7{,}22$. Portanto a redução total após o tratamento/desinfecção em terra vale: $S = 741 * 3{,}49 * 7{,}22 \cong 18672$. Portanto a concentração no limite da zona de proteção é dada por: $C = \frac{C_0}{6121} = \frac{4{,}5x10^6}{18672} \cong 241 NMP/100mL < 1000 NMP/100mL$, satisfazendo portanto a condição de balneabilidade.

Emissário Submarino de Santos/São Vicente

Cenário 1 A: Corresponde a situação operacional do emissário, considerando vazão de 3,0 m^3/s com 16 dos 20 bocais de *risers* funcionando, visto que os restantes estavam assoreados, segundo inspeção realizada pela SABESP em 1999 (aplicação do *CORMIX 2* para difusor alternado). Essa análise foi feita considerando a EPC promovendo uma redução por tratamento/desinfecção de coliformes fecais de 3 x 10^8 NMP/100mL para 4,5 x 10^6 NMP/100mL. A velocidade de corrente convergente a praia de José Menino foi considerada uniforme de 0,40 m/s, admitindo-se regime permanente e sem influência de maré. Considerou-se perfil de densidade linearmente estratificado, com diferença de massa específica de 2 kg/m^3 entre a superfície e o fundo. O comportamento do jato "boiante" inicialmente dominado pela quantidade de movimento, logo em seguida passa a sofrer a influência do empuxo e a pluma é defletida pela corrente. Ao final do campo próximo, a pluma confinada desenvolve-se ao longo da linha do difusor, espalhando-se também lateralmente sob o efeito advectivo da corrente. A diluição inicial encontrada na altura inicial de confinamento de 7,5 m foi $S_0 = 19{,}8$. A diluição complementar devido ao espalhamento "boiante" sucessivo e a ação advectiva turbulenta foi $S_m = 39{,}5$. A diluição devido ao decaimento bacteriano, aplicando-se a lei de Chick e considerando T90 = 2h, corresponde a $S_{db} = 18{,}36$. Portanto a redução total após o tratamento/desinfecção em terra vale: $S = 19{,}8 * 39{,}5 * 18{,}36 \cong 14359$. Portanto a concentração no limite da zona de proteção é dada por: $C = \frac{C_0}{14359} = \frac{4{,}5x10^6}{14359} \cong 313 NMP/100mL < 1000 NMP/100mL$, satisfazendo a condição de balneabilidade.

PME 5025-Fundamentos da Turbulência 2016
Prof. Jaime E. Ortiz - EPUSP

Cenário 1B: segue as mesmas características do cenário 1 A, com a única diferença de que não ocorre estratificação de densidade na coluna vertical.Nesse caso a pluma atinge a superfície livre já no campo próximo (profundidade de 10 m), com diluição inicial $S_0 = 32{,}2$. Há uma insuficiência de mistura dos jatos individuais na ascensão da coluna e a diluição complementar e a diluição por decaimento bacteriano corresponderam a $S_m = 12{,}8$ e $S_{db} = 18{,}36$. Portanto a redução total após o tratamento/desinfecção em terra vale: $S = 32{,}2 * 33{,}9 * 18{,}36 \cong 20041$. Portanto a concentração no limite da zona de proteção é dada por: $C = \frac{C_0}{20041} = \frac{4{,}5x10^6}{20041} \cong 225 NMP/100mL < 1000 NMP/100mL$, satisfazendo a condição de balneabilidade.

Cenário 1 C: corresponde a situação de projeto do emissário para a etapa final, considerando vazão de 7,0 m^3/s com 40 bocais de *risers* funcionando(aplicação do *CORMIX 2* para difusor alternado). Essa análise foi feita considerando a EPC promovendo uma redução por tratamento/desinfecção de coliformes fecais de 3 x 10^8 NMP/100mL para 4,5 x 10^6 NMP/100mL. A velocidade de corrente convergente a praia de José Menino foi considerada uniforme de 0,40 m/s, admitindo-se regime permanente e sem influência de maré. Considerou-se perfil de densidade linearmente estratificado, com diferença de massa específica de 2 kg/m^3 entre a superfície e o fundo. O comportamento do jato "boiante" inicialmente dominado pela quantidade de movimento, logo em seguida passa a sofrer a influência do empuxo e a pluma é defletida pela corrente. Ao final do campo próximo, a pluma confinada desenvolve-se ao longo da linha do difusor, espalhando-se também lateralmente sob o efeito advectivo da corrente. A diluição inicial encontrada na altura inicial de confinamento de 7,5 m foi $S_0 = 21{,}5$. A diluição complementar devido ao espalhamento "boiante" sucessivo e a ação advectiva turbulenta foi $S_m = 19{,}4$. Há uma insuficiente mistura dos jatos individuais na ascensão da coluna. A diluição devido ao decaimento bacteriano, aplicando-se a lei de Chick e considerando T90 = 2h, corresponde a $S_{db} = 17{,}8$. Portanto a redução total após o tratamento/desinfecção em terra vale: $S = 21{,}5 * 19{,}4 * 17{,}8 \cong 7424$. Portanto a concentração no limite da zona de proteção é dada por:

PME5325-Fundamentos da Turbulência 2016 EPUSP Prof. Jayme P. Ortiz

$C = \frac{C_0}{7424} = \frac{4{,}5x10^6}{7424} \cong 606 NMP/100mL < 1000 NMP/100mL$, satisfazendo a condição de balneabilidade.

Cenário 1 D: segue as mesmas características do cenário 1C, com a única diferença de que não ocorre estratificação de densidade na coluna vertical.Nesse caso a pluma atinge a superfície livre já no campo próximo (profundidade de 10 m), com diluição inicial $S_0 = 34{,}9$. Há uma insuficiência de mistura dos jatos individuais na ascensão da coluna e a diluição complementar e a diluição por decaimento bacteriano corresponderam a $S_m = 12{,}97$ e $S_{db} = 17{,}8$. Portanto a redução total após o tratamento/desinfecção em terra vale: $S = 34{,}9 * 12{,}97 * 17{,}8 \cong 8057$. Portanto a concentração no limite da zona de proteção é dada por: $C = \frac{C_0}{8057} = \frac{4{,}5x10^6}{8057} \cong 559 NMP/100mL < 1000 NMP/100mL$, satisfazendo a condição de balneabilidade.

Emissário Submarino de Ilha Bela

Cenário 1 A: nesse caso, como o sistema difusor é muito curto (2,5 m), sendo inferior a profundidade média nesse trecho que é de 24 m, considerou-se para efeito de simulação um orifício simples de descarga com área equivalente calculada como a soma das áreas dos orifícios individuais (aplicação do *CORMIX 1)*. Esse cenário corresponde a situação final de projeto do emissário, ou seja, considerando uma vazão de 30 L/s para todos os 7 orifícios operando, sendo substituídos por um único orifício de área equivalente.Essa análise foi feita considerando a EPC promovendo uma redução por tratamento/desinfecção de coliformes fecais de 3 x 10^8 NMP/100mL para 4,8 x 10^6 NMP/100mL. A velocidade de corrente convergente à praia da Enseada considerada uniforme foi de 0,30m/s, admitindo-se regime permanente e sem influência de maré. Considerou-se perfil de densidade linearmente estratificado, com diferença de massa específica de 2 kg/m^3 entre a superfície e o fundo. A pluma fica confinada na altura terminal de equilíbrio de 5,62 m. O comportamento do jato "boiante" inicialmente dominado pela quantidade de movimento, logo em seguida passa a sofrer a influência do empuxo e a pluma é defletida pela corrente. A diluição inicial encontrada na altura

PME5025-Fundamentos da Turbulência 2016 Prof. Jayme P. Ortiz EPUSP

de confinamento foi S_0 = *107,7*. A diluição complementar foi S_m = *4,42*.A diluição devido ao decaimento bacteriano, aplicando-se a lei de Chick e considerando T90 = 2h, corresponde a S_{db} = *1,26*. Portanto a redução total após o tratamento/desinfecção em terra vale: *S = 107,7*4,42*1,26≅600*. Portanto a concentração no limite da zona de proteção é dada por: $C = \frac{C_0}{600} = \frac{4{,}8x10^6}{600} \cong 8000 MP/100mL > 1000 NMP/100mL$, não satisfazendo a condição de balneabilidade.

Cenário 1B: segue as mesmas características do cenário 1 A, com a única diferença de que não ocorre estratificação de densidade na coluna vertical.Nesse caso a pluma atinge a superfície livre já no campo próximo com diluição inicial S_0 = *1123,9*. A diluição complementar e a diluição por decaimento bacteriano corresponderam a S_m= *2,02 e* S_{db} = *1,26*. Portanto a redução total após o tratamento/desinfecção em terra vale: *S = 1123,9 *2,02*1,26≅2861*. Portanto a concentração no limite da zona de proteção é dada por: $C = \frac{C_0}{2861} = \frac{4{,}8x10^6}{2861} \cong 1678 NMP/100mL > 1000 NMP/100mL$, não satisfazendo a condição de balneabilidade.

Um resumo dos resultados comparativos para todos os emissários está apresentado na *figura 7.30*, onde se observa que o emissário do Araçá não possui eficiência suficiente para atender o padrão da legislação, assim como o emissário de Ilha Bela que negligencia completamente a legislação, apresentando-se curto demais, descarregando na zona balneária com concentrações de coliforme muito superiores à 1000 NMP/100 mL.

Refazendo-se os cálculos anteriores sem considerar o tratamento preliminar em terra com desinfecção (ausência de cloração), obtém-se resultados muito menos favoráveis ambientalmente, resultados esses que estão resumidos na *figura 7.31*. Verifica-se nesses casos que todos os efluentes atingem a faixa de proteção de 300 m com valores acima de 1000 NMP/100 mL, com exceção do emissário de Guarujá em épocas de ambiente não estratificado, verificando-se, portanto, a importância da cloração.

PME 5025-Fundamentos da Turbulência 2016 Prof. Jayme P. Ortiz EPUSP

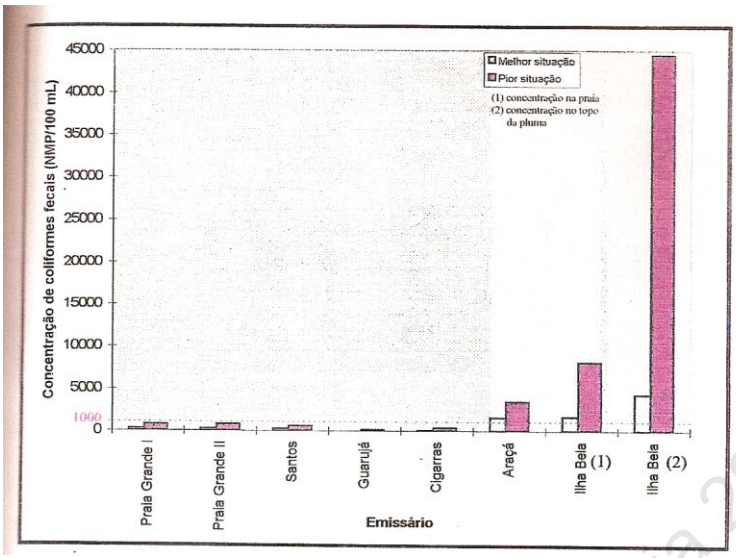


Figura 7.30 Concentração de coliformes fecais dos esgotos na faixa de proteção de 300 m das praias nas situações dos cenários analisados para os emissários da SABESP

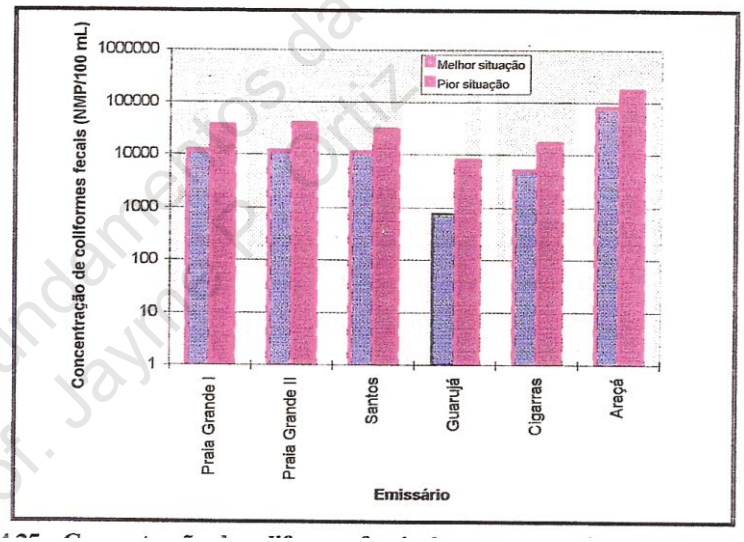


Figura 7.31 Concentração de coliformes fecais dos esgotos na faixa de proteção de 300 m das praias nas situações dos cenários analisados para os emissários da SABESP, sem aplicar a cloração.

PME5325-Fundamentos da Turbulência
Prof. Jayme P. Ortiz
EPUSP 2016

7.7.6. Novas Considerações sobre o Processo de Dispersão das Plumas dos Emissários da Baixada Santista

7.7.6.1. Praia Grande – Subsistema I:

No trabalho de Marcellino (2000), os cenários de modelagem foram feitos para as condições de projeto dos emissários submarinos e dos sistemas difusores, que são condições ideais, nem sempre atendidas, seja porque a construção desses sistemas não atendeu às condições de projeto, seja porque, por falta de manutenção, os sistemas não funcionaram de acordo com o projeto, havendo, portanto, a necessidade de simular as condições de real operação do sistema. O subsistema I da Praia Grande é um caso típico nessas condições.

O projeto técnico do sistema de esgotos sanitários de Praia Grande foi elaborado pela HIDROCONSULT, no período de 1980 a 1982, tendo sido concebido em três subsistemas independentes que contribuem para três emissários submarinos, conforme representado na *figura 7.32.*

As principais características de projeto do subsistema I estão resumidas na tabela 7.4 apresentada anteriormente, com sistema difusor com 435 m de comprimento e com 174 furos de diâmetro 65 mm alternados na própria tubulação formando um ângulo de 60° com a horizontal, com espaçamento de 2,5 m entre eles, e com um flange terminal de diâmetro 130 mm.

Figura 7.32 Representação esquemática dos subsistemas I, II, III da Praia Grande

PME5325-Fundamentos da Turbulência 2016 Prof. Jayme P. Ortiz EPUSP

Essas condições de projeto foram simuladas por Marcellino(2000), considerando os cenários apresentados no item anterior. Esses furos eram compatíveis para efluentes mini peneirados, provenientes da Estação de Tratamento Preliminar que seria implantada em uma segunda etapa. Como essa estação não foi implantada, como era prevista no projeto, a preocupação da SAPESP com o entupimento e o assoreamento do sistema difusor fez com que essa companhia modificasse o projeto original no trecho do sistema difusor, desfigurando-o completamente, conforme resumido abaixo:

- 5 *risers* com diâmetro interno de 175 mm;
- Cada *riser* com dois furos de 100 mm de diâmetro;
- Espaçamento entre *risers* de 5,0 m;
- Sistema difusor com 30 m;
- Estrutura final do tipo flange chaminé com 300 mm de diâmetro e 12 furos de 75 mm de diâmetro;
- Operação sem a Estação de Tratamento Preliminar, ou seja, bombeamento para a torre de carga direto da estação elevatória com os seguintes equipamentos: gradeamento com limpeza automática, cloração, neutralização de odores, torre de carga.

Dugaich dentro das atividades de seu trabalho não publicado de 2004 e de seu mestrado inconcluso, coordenou uma operação de inspeção e mergulhou na região do sistema difusor do subsistema I, onde pode verificar que os 5 *risers* difusores estavam com a parte superior degoladas, mas ainda funcionando, e a saída em chaminé estava com os furos bloqueados com redes de pesca, que foram removidas de seu corpo. A tabela 7.6 apresenta as principais características geométricas comparativas entre os sistemas difusores, projetado e construído para o emissário de Praia Grande I:

PME5826-Fundamentos da Turbulência 2016
Prof. Jayme P. Ortiz
EPUSP

Tabela 7.6. Características geométricas dos sistemas difusores projetado e executado-Subsistema I, Praia Grande

	NS	D_o *(cm)*	*e (cm)*	D_{ch} *(cm)*	L_D *(m)*	ΣA_o $(m)^2$	*H (m)*	Y_o *(m)*	Y_o/D_o
Projetado	*174,0*	*6,5*	*2,5*	*13,0*	*435,0*	*0,590*	*12,5*	*11,2*	*172,3*
Executado	*5,0*	*17,5*	*5,0*	*30,0*	*25,0*	*0,191*	*12,5*	*11,2*	*64,0*

Projetado $\Rightarrow \frac{Y_0}{D_0} = 172{,}3 > 0{,}22Fd_0 = 3{,}24 \rightarrow$ descarga estável profunda;

Executado $\Rightarrow \frac{Y_0}{D_0} = 64{,}0 > 0{,}22Fd_0 = 15{,}8 \rightarrow$ descarga estável profunda.

As tabela 7.7a e 7.7b apresentam, respectivamente, alguns resultados de escalas de comprimento / tempo e de diluições iniciais, a partir de simulações com o *CORMIX 2* para os dois casos de difusores (projetado e executado), considerando a concentração na descarga de coliforme $C_0 = 4{,}5x10^6\, NMP/100mL$, admitindo-se efluente conservativo no campo próximo, ambiente não estratificado, com velocidade de corrente de 0,45 m/s.

Tabela 7.7 (a) Escalas de comprimento e de tempo – difusores projetado e executado do subsistema I – Praia Grande; (b) Diluições iniciais - difusores projetado e executado do subsistema I – Praia Grande.

(a)

	U_0 *(m/s*	q_0 (m^2/s)	Fd_0	$\dot{m}_0$ (m^3/s^2)	j_0 (m^3/s^3)	L_Q (m)	L_M (m)	L_m (m)	t_M (s)	t_m (s)
Proj.	1,8	0,003	14,7	0,0043	0,00055	0,001	0,64	0,02	7,83	0,05
Exec.	14,4	0,041	71,9	0,6007	0,0096	0,003	13,3	2,97	62,6	6,59

(b)

	X_1 (m)	Y_1 (m)	Z_1 (m)	S_1	C (NMP/100mL)
Projetado	58,80	0	11,20	2326,20	1935,40
Executado	58,80	0	11,20	124,40	36182,00

Observações: X_1, Y_1, $Z_1 \rightarrow$ correspondem às coordenadas do centro da pluma no final do campo próximo na superfície livre;

S_1, $C \rightarrow$ correspondem às diluições e concentrações no final do campo próximo.

PME5325-Fundamentos da Turbulência 2016 EPUSP Prof. Jayme P. Ortiz

Os resultados da tabela 7.7 a, mostram um aumento significativo da velocidade e da vazão de descarga por orifício, e conseqüentemente um aumento significativo do número de Froude densimétrico e dos fluxos de quantidade de movimento e de empuxo, nas saídas dos orifícios para o emissário com menor comprimento de sistema difusor (executado). Com isso as escalas de comprimento de transição jato-pluma e de jato/corrente cruzada (L_M, L_m), assim como as respectivas escalas de tempo, são bem maiores, no caso do sistema difusor executado, o que implica em menor eficiência na diluição inicial, conforme mostrado na tabela 7.7b.

7.7.6.2. Praia Grande – Subsistema III

O subsistema III da Praia Grande representado na *figura 7.32* dispõe de licença de instalação tendo sido construído dentro do Programa Onda Limpa da SABESP com recursos de financiamento internacional (programa *JBIC – Japan Bank International Cooperation).* Em um estudo da FCTH para a SABESP foram simulados vários cenários da dispersão da pluma do efluente do subsistema III, a partir do projeto do sistema difusor apresentado pela ENCIBRA à SABESP (ENCIBRA, 2002). Apresenta-se a seguir os resultados de simulações com o *CORMIX 2* para alguns cenários de projeto:

- Sistema difusor com 420 m, 75 *risers* com 3 orifícios cada, totalizando 225 orifícios de saída com diâmetros de 6 cm; emissário submarino com comprimento total de 3420 m, vazão de efluente 1,4 m^3/s.
- Sistema difusor com 298 m, 75 *risers* com 2 orifícios cada, totalizando 150 orifícios de saída, com diâmetros de 6 cm; emissário submarino com comprimento total de 3298 m, vazão de efluente 1,4 m^3/s.

As tabelas 7.8a e 7.8b apresentam, respectivamente, alguns resultados de escalas de comprimento / tempo e de diluições iniciais, a partir de simulações com o *CORMIX 2* para os dois casos de alternativas de projeto de difusores, considerando a concentração na descarga de coliforme $C_0 = 4{,}5x10^6\, NMP/100mL$, admitindo-se efluente

PME5325-Fundamentos da Turbulência 2016
Prof. Jayme P. Ortiz
EPUSP

conservativo no campo próximo, ambiente não estratificado, com velocidade de corrente de 0,50 m/s.

Tabela 7.8: (a) Escalas de comprimento e de tempo – alternativas de projeto subsistema III – Praia Grande; (b) Diluições iniciais – alternativas de projeto subsistema III– Praia Grande.

(a)

	U_0 *(m/s)*	q_0 (m^2/s)	Fd_0	$\dot{m}_0$ (m^3/s^2)	j_0 (m^3/s^3)	L_Q (m)	L_M (m)	L_m (m)	t_M (s)	t_m (s)
Dif. 420 m	3,67	0,0033	31,2	0,01223	0,00077	0,001	1,46	0,05	15,9	0,098
Dif.298 m	5,50	0,0047	46,8	0,02585	0,00108	0,001	2,45	0,1	23,9	0,207

(b)

	X_1 (m)	Y_1 (m)	Z_1 (m)	S_1	C (NMP/100mL)
Dif. 420 m	58,80	0	11,20	1855,7	2424,92
Dif. 298 m	58,80	0	11,20	1318,1	3414,01

Observações: X_1, Y_1, $Z_1 \rightarrow$ correspondem às coordenadas do centro da pluma no final do campo próximo na superfície livre;

S_1, $C \rightarrow$ correspondem às diluições e concentrações final do campo próximo.

Os resultados da tabela 7.8 a, mostram um aumento da velocidade e da vazão de descarga por orifício, e conseqüentemente um aumento do número de Froude densimétrico e dos fluxos de quantidade de movimento e de empuxo nas saídas dos orifícios para o emissário com menor comprimento de sistema difusor. Com isso as escalas de comprimento de transição jato-pluma e de jato/corrente cruzada (L_M, L_m), assim como as respectivas escalas de tempo, são maiores, no caso do sistema difusor

PME5325-Fundamentos da Turbulência 2016
Prof. Jayme P. Ortiz
EPUSP

com comprimento 298 m, o que implica em menor eficiência na diluição inicial, conforme mostrado na tabela 7.8b.

7.7.6.3. Santos – Reforma de Emissário

O emissário de Santos representado dispõe de licença de instalação, cujo novo sistema difusor foi instalado dentro do Programa Onda Limpa da SABESP com recursos de financiamento internacional (programa *JBIC – Japan Bank International Cooperation).*

Em um estudo da FCTH para a SABESP foram simulados vários cenários da dispersão da pluma do efluente do emissário, a partir do antigo projeto do sistema difusor e do projeto de reforma proposto pela JP/Estática (CONSÓRCIO JP/ESTÁTICA, 2002). Apresenta-se a seguir os resultados de simulações com o *CORMIX 2* para alguns cenários de projeto:

- Sistema difusor antigo com 200 m, 75 *risers* com 40 saídas de diâmetros de 30 cm; emissário submarino com comprimento total de 4000 m, vazão de efluente 5,3 m^3/s.
- Sistema difusor novo com 270 m, 64 *risers* de 800 mm de diâmetro interno, contendo cada *riser*, 4 saídas de diâmetro 100 mm; emissário submarino com comprimento total de 4000 m, vazão de efluente 5,3 m^3/s.

As tabelas 7.9a e 7.9b apresentam, respectivamente, alguns resultados de escalas de comprimento / tempo e de diluições iniciais, a partir de simulações com o *CORMIX 2* para os dois casos de alternativas de projeto de difusores, considerando a concentração na descarga de fósforo de $C_0 = 5{,}24 mg/L$, admitindo-se efluente conservativo no campo próximo, ambiente não estratificado, com velocidade de corrente de 0,15 m/s.

PME5325-Fundamentos da Turbulência 2016 Prof. Jayme P. Ortiz EPUSP

Tabela 7.9: (a) Escalas de comprimento e de tempo – difusores antigo projeto e novo projeto de reforma de Santos; (b) Diluições iniciais - difusores antigo projeto e novo projeto de reforma de Santos.

(a)

	U_0 *m/s*	q_0 (m^2/s)	Fd_0	$\dot{m}_0$ (m^3/s^2)	j_0 (m^3/s^3)	L_Q (m)	L_M (m)	L_m (m)	t_M (s)	t_m (s)	U_0 *m/s*
Antigo Projeto	1,87	0,0265	7,13	0,04967	0,006103	0,014	1,49	2,2	8,14	14,7	1,87
Novo Projeto -Ref.	2,64	0,0196	17,3	0,05174	0,004521	0,007	1,89	2,3	11,4	15,3	2,64

(b)

	X_1 (m)	Y_1 (m)	Z_1 (m)	S_1
Antigo Projeto	112,26	0	11	62,6
Novo Projeto-Ref	153,84	0	12	89,1

Observações: X_1, Y_1, $Z_1 \rightarrow$ correspondem às coordenadas do centro da pluma no final do campo próximo na superfície livre;

$S_1 \rightarrow$ corresponde às diluições e concentrações final do campo próximo.

Os resultados da tabela 7.9 a, mostram algumas diferenças não muito significativas entre as duas alternativas, com diluições baixas no campo próximo, inferiores ao valor mínimo de referência de projeto 100, visto que o lançamento do efluente nesse caso ocorre dentro da baía.

PME5525-Fundamentos da Turbulência 2016 Prof. Jayme P. Ortiz EPUSP

7.7.6.4. A Simulação em Modelo Físico e Numérico das Plumas dos Efluentes dos Emissários Submarinos da Baixada Santista

7.7.6.4.1. Simulações em Modelo Físico

Operou-se no Centro Tecnológico de Hidráulica – CTH um modelo hidráulico construído segundo semelhança de Froude em escala distorcida (horizontal 1:1200 e vertical 1:200), onde foram representados o estuário de Santos e o canal do Porto. Esse modelo foi adaptado para o estudo dos emissários submarinos de Santos, Guarujá e Praia Grande. Os emissários foram considerados com seus comprimentos submersos de projeto e, no caso do emissário de Santos considerou-se ainda a alternativa de um prolongamento de 1 km. A *figura 7.33* mostra uma vista geral do modelo físico construído no CTH.

Os estudos em modelo físico foram possíveis, graças a um projeto de parceria envolvendo o grupo de pesquisa que lidero e o grupo liderado pelo Prof. Paolo Alfredini, responsável pelos estudos em modelo físico. A viabilidade dos estudos foi possível devido a aprovação de um projeto com recursos do FEHIDRO – Fundo Estadual de Recursos Hídricos (FEHIDRO, 2008) e com o apoio da Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica – FCTH. Para os estudos em modelo físico foi desenvolvida uma técnica para descarga de uma vazão controlada de um corante na saída dos emissários, de modo a se estudar o processo de dispersão superficial das plumas dos efluentes (ARASAKI et al, 2008). Não foi possível representar, todavia, os sistemas difusores e a diluição no campo próximo, tendo em vista as pequenas profundidades devido às escalas disponíveis. As simulações em modelo físico foram feitas considerando as variações de vento e maré. As *figuras 7.34 e 7.35* mostram a pluma superficial do emissário de Santos com 4 km e 5 km de extensão, respectivamente. A *figura 7.36* mostra o lançamento simultâneo dos efluentes dos emissários de Praia Grande I e II.

Os estudos em modelo físico mostraram que não há interferência entre as plumas dos efluentes dos emissários estudados e que a extensão de 1 km no comprimento original do emissário de Santos facilitaria o encaminhamento da pluma para fora da baía. Ainda, dentro do escopo do relatório FEHIDRO, foram feitos estudos de

PME5025 Fundamentos da Turbulência 2016 Prof. Jayme E. Ortiz EPUSP

simulações computacionais, apresentados a seguir, de modo a fornecer subsídios aos estudos em modelo físico e desenvolver um trabalho de calibração dos modelos.

Figura 7.33 – Vista geral do modelo físico construído no CTH

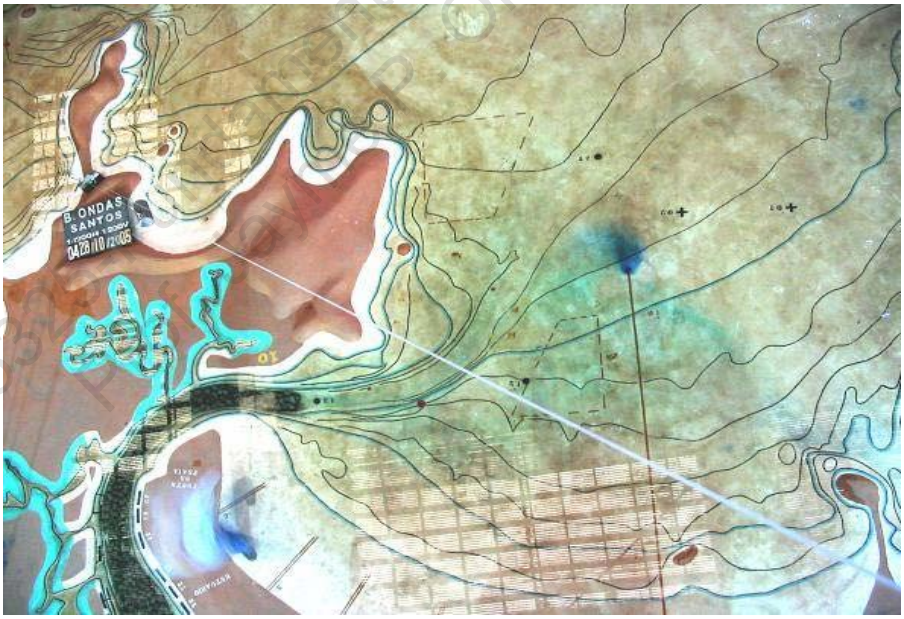


Figura 7.34 - Pluma efluente após 5,5 ciclos de maré (emissário de Santos com 4 km de extensão)

Figura 7.35 - Pluma efluente após 6 ciclos de maré (emissário de Santos com 5 km de extensão)

Figura 7.36 – Lançamento simultâneo das plumas de efluente dos emissários de Praia Grande I e II

7.7.6.4.2. Simulações Computacionais

As simulações computacionais que serão apresentadas a seguir consideraram o sistema difusor conectado diretamente e na mesma direção do final da tubulação do emissário submarino (sistema difusor do tipo unidirecional). Condições de estratificação no mar não foram consideradas nas simulações realizadas.

As simulações do processo de dispersão da pluma no campo próximo foram feitas a partir da utilização do CORMIX 2, que contém uma metodologia de cálculo para sistemas difusores submersos de saídas múltiplas, considerando-se as condições de projeto apresentadas nos itens anteriores.

A tabela 7.10 mostra as condições de descarga na saída dos emissários da Baixada Santista, condições essas impostas para rodar o CORMIX 2, sendo C_0 a concentração de fósforo na seção de saída da estação de tratamento preliminar e Q a vazão volumétrica de projeto da descarga do efluente:

PME5325-Fundamentos da Turbulência 2016
Prof. Jaime R. Ortiz
EPUSP

Tabela 7.10. Condições iniciais inseridas para rodar o CORMIX 2.

Emissários	**C_o (mg/L)**	**Q (m^3/s)**
Santos	5,24	5,3
Guarujá	5,24	1,45
Praia Grande 1	5,24	1,041

Os valores de concentração de fósforo obtidos na simulação com o CORMIX, na saída do campo próximo, foram utilizados para as simulações na transição e no campo distante, utilizando-se, nesse caso, a dinâmica dos fluidos computacional – *CFD*, através do código FLUENT 6.1.22, que se baseia no método de volumes finitos. Dentre as opções oferecidas pelo FLUENT, utilizou-se o *modelo de mistura* que simula a mistura multifásica: mar e efluente. O *modelo de mistura* pode ser utilizado para modelar escoamentos cujas fases movem-se com diferentes velocidades. É possível a modelagem de *n* fases resolvendo-se as equações da quantidade de movimento, da continuidade e da energia para a mistura, as equações de frações de volume para as

fases secundárias e as expressões algébricas para as velocidades relativas. As equações seguintes são utilizadas no modelo de mistura para resolver a dispersão da pluma:

- Equação da continuidade para a mistura:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m) + \nabla.(\rho_m \vec{\mathrm{v}}_\mathrm{m}) = \dot{m} \qquad 7.84$$

Onde $\vec{\mathrm{v}}_m$ refere-se a uma velocidade média de transporte de massa:

$$\vec{\mathrm{v}}_m = \frac{\sum_{k=1}^{n} \alpha_k \rho_k \vec{\mathrm{v}}_k}{\rho_\mathrm{m}} \qquad 7.85$$

ρ_m é a densidade da mistura:

$$\rho_m = \sum_{k=1}^{n} \alpha_k \rho_k \qquad 7.86$$

α_k é a fração de volume da fase *k*.

- Equação da quantidade de movimento para a mistura:

A equação da quantidade de movimento para a mistura pode ser obtida somando as equações individuais da quantidade de movimento para todas as fases. Ela pode ser obtida como:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m \vec{\mathrm{v}}_m) + \nabla.(\rho_m \vec{\mathrm{v}}_m \vec{\mathrm{v}}_m) = -\nabla p + \nabla.\left[\mu_m \left(\nabla \vec{\mathrm{v}}_m + \nabla \vec{\mathrm{v}}_\mathrm{m}^T\right)\right] + \rho_m \vec{g} + \vec{F} + \nabla.\left(\sum_{k=1}^{n} \alpha_k \rho_k \vec{\mathrm{v}}_{\mathrm{dr,k}} \vec{\mathrm{v}}_{\mathrm{dr,k}}\right) \qquad 7.87$$

onde *n* é o número de fases, $\vec{F}$ é a força de campo, e μ_m é a viscosidade da mistura:

$$\mu_m = \sum_{k=1}^{n} \alpha_k \mu_k \qquad (5)$$

$\vec{\mathrm{v}}_{dr,k}$ é a *drift velocity* para a fase secundária *k*:

$$\vec{\mathrm{v}}_{dr,k} = \vec{\mathrm{v}}_k - \vec{\mathrm{v}}_m \qquad 7.88$$

- Velocidade relativa e *drift velocity*

A velocidade relativa (também referida como *slip velocity*) é definida como a velocidade da fase secundária *(p)* relativa a fase primária *(q)*:

$$\vec{\mathrm{v}}_{pq} = \vec{\mathrm{v}}_p - \vec{\mathrm{v}}_q \qquad 7.89$$

PME5525-Fundamentos da Turbulência 2016 EPUSP Prof. Jayme P. Ortiz

Drift velocity $\left(\vec{v}_{dr,p}\right)$ e a velocidade relativa ($\left(\vec{v}_{pq}\right)$ estão conectadas pela seguinte equação:

$$\vec{v}_{dr,p} = \vec{v}_{pq} - \sum_{k=1}^{n} \frac{\alpha_k \rho_k}{\rho_m} \vec{v}_{qk} \qquad 7.90$$

As simulações aqui apresentadas foram feitas na presença e na ausência de descargas transitórias, considerando os dados de variação de maré (figura 7.37) nas duas entradas da baía de Santos: o canal de acesso ao porto de Santos e o canal do Mar Pequeno. Nessas simulações considerou-se também o efeito do vento no processo de dispersão do efluente.

PME5325-Fundamentos da Turbulência 2016 EPUSP Prof. Jayme P. Ortiz

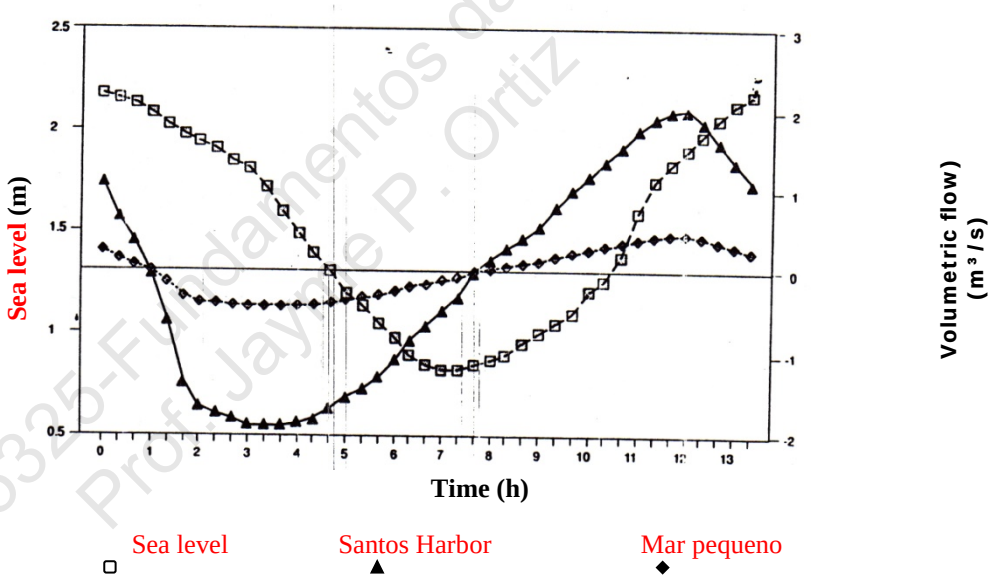
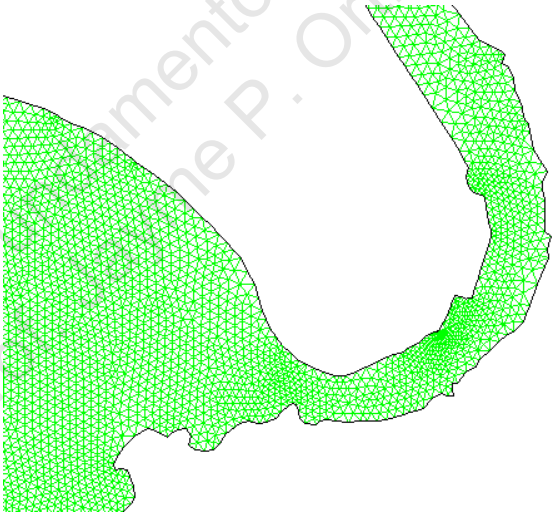


Figura 7.37. Descarga transiente considerando a variação da maré no canal de acesso ao porto de Santos e no canal do Mar Pequeno. (*fonte ARASAKI et al, 2008*)

Considerando as condições de contorno de concentrações do efluente no final do campo próximo obtidas nas simulações com o CORMIX 2, os seguintes cenários foram simulados para a transição e o campo distante rodando o FLUENT, conforme sumarizado na tabela 7.14: o primeiro cenário corresponde a mar estagnado sem efeito

de vento para o emissário submarino de Santos; o segundo cenário corresponde a imposição de variação da maré sem efeito de vento para o emissário submarino de Santos; o terceiro cenário corresponde a imposição de variação da maré com efeito de vento para o emissário submarino de Santos; o quarto cenário corresponde a mar estagnado sem efeito de vento para os três emissários submarinos (Santos, Guarujá e Praia Grande I); o quinto cenário corresponde a imposição de variação de maré com efeito de vento para os três emissários submarinos.

A criação da geometria do estuário de Santos foi feita em AUTOCAD, que por sua vez foi exportado para o Gambit 6.2.16., gerador de malha que acompanha o Fluent (FEHIDRO, 2008 e Ortiz et al, 2008). No Gambit a malha criada totalizou 58089 nós e 112806 volumes. Uma malha não estruturada 2D triangular foi construída para todo o estuário de Santos, incluindo os canais e as regiões da Praia Grande I e de Guarujá. A figura 7.38 apresenta um detalhe da discretização da malha na região de acesso ao canal do porto de Santos:



PME5325-Fundamentos da Turbulência 2016
Prof. Jaime P. Ortiz
EPUSP

Figura 7.38. Detalhe da discretização da malha e de parte do volume de controle (canal de acesso ao porto de Santos).

Resultados

Os resultados apresentados na tabela 7.11, obtidos a partir da utilização do CORMIX 2, mostram valores de diluição inicial e de dimensões de plumas no campo próximo para as simulações de descarga do efluente sanitário dos emissários de Santos,

Guarujá e Praia Grande I, considerando as descargas de projeto *(Q)* desses emissários. As dimensões da pluma (*B* = metade da largura da pluma; *X, Y, Z* espessuras da pluma nas três coordenadas) foram computadas assumindo a origem do sistema de coordenadas *xyz* no centro do sistema difusor. A diluição inicial (S_{FNF}) é definida como a relação entre o parâmetro de concentração de descarga (C_o) e o parâmetro de concentração *(C)* no final do campo próximo. Os resultados mostram valores de diluição abaixo de 100 para o emissário de Santos, enquanto que para os emissários de Praia Grande e Guarujá, esses valores são maiores que 100.

A figura 7.39 mostra os contornos de concentração para o primeiro cenário especificado na tabela 7.14, rodando o Fluent. A figura 7.39A apresenta os contorno de concentração para um ciclo de maré enquanto a figura 7.39B corresponde a doze ciclos de maré.

A figura 7.40 mostra o segundo cenário rodando o Fluent. Nesse caso a descarga do efluente ocorre considerando descarga transiente no canal do porto de Santos e no canal do Mar Pequeno. Na figura 7.40A, a descarga do efluente corresponde a 3 ciclos de maré e a pluma segue em direção do mar aberto. O mesmo comportamento ocorre nas figuras 7.40 B, C e D, para 6, 10 e 12 ciclos de maré, respectivamente.

PME5325-Fundamentos da Turbulência 2016
Prof. Jayme P. Ortiz EPUSP

Tabela 7.11. Condições de contorno para as simulações com o Fluent

Cenários	**Emissários Submarinos**	**Efluente**	**Canal do Porto de Santos**	**Canal do Mar Pequeno**	**Efeito de Vento**
1	Santos	Q = 5,3 m³/s C_o = 0,0837 mg/L	----------	----------	----------
2	Santos	Q = 5,3 m³/s C_o = 0,0837 mg/L	Descarga Transiente	Descarga Transiente	----------
3	Santos	Q = 5,3 m³/s C_o = 0,0837 mg/L	Descarga Transiente	Descarga Transiente	2 m/s
4	Santos	Q = 5,3 m³/s C_o = 0,0837 mg/L	----------	----------	----------
	Guarujá	Q = 1,45 m³/s C_o = 0,005 mg/L	----------	----------	
	Praia Grande 1	Q = 1,04 m³/s C_o = 0,0421 mg/L	----------	----------	
5	Santos	Q = 5,3 m³/s C_o = 0,0837 mg/L	Descarga Transiente	Descarga Transiente	2 m/s
	Guarujá	Q = 1,45 m³/s C_o = 0,005 mg/L	Descarga Transiente	Descarga Transiente	
	Praia Grande 1	Q = 1,04 m³/s C_o = 0,0421 mg/L	Descarga Transiente	Descarga Transiente	

PME5325-Fundamentos da Turbulência 2016
Prof. Jayme P. Ortiz
EPUSP

Tabela 7.12. Diluições iniciais e dimensões de pluma no campo próximo para o fósforo total

Emissários Submarinos	**C_o (mg/L)**	**C_{FNF} (mg/L)**	**S_{FNF}**	**Q (m^3/s)**	**U_c (m/s)**	**X (m)**	**Y (m)**	**Z (m)**	**B (m)**
Santos	5,24	0,0837	62,6	5,3	0,15	112,26	0	11	100,69
Guarujá	5,24	0,005	1053,5	1,45	0,45	217,78	0	14	121,39
Praia Grande 1	5,24	0,0421	124,4	1,041	0,45	58,8	0	11,2	12,84

Figura 7.39. Contornos de concentração (mg/L) para o primeiro cenário: (A) 1 ciclo de maré e (B) 12 ciclos de maré.

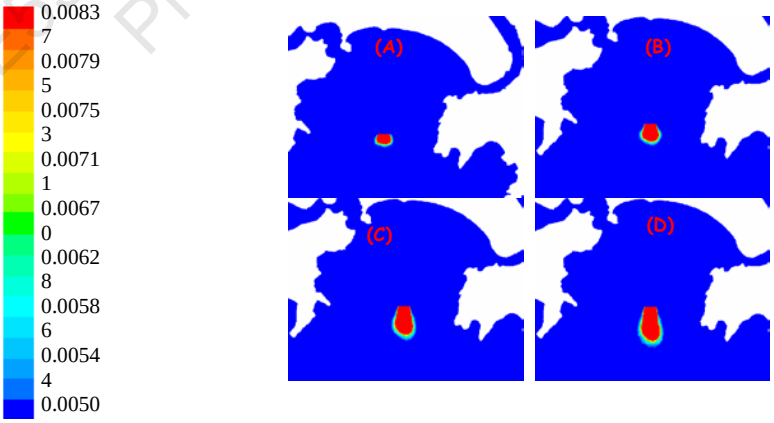


Figura 7.40. Contornos de concentrações (mg/L) para o segundo cenário após: (A) 3; (B) 6; (C) 10 e (D) 12 ciclos de maré.

PME 3425-Fundamentos da Turbulência 2016 Prof. Jayme P. Ortiz EPUSP

A figura 7.41 apresenta os resultados do terceiro cenário rodando o Fluent. Nesse cenário, a velocidade do vento é simulada com 2 m/s atuando a 50º na direção do estuário. Pode-se ver na figura o efeito do vento no processo de dispersão da pluma. A pluma se dispersa em quase toda a baía de Santos, e próximo da costa, com uma diluição adicional alcançando 66,7.

A figura 7.42 mostra os contornos de concentrações para o quarto cenário especificado na tabela 7.14. O mar está estagnado e a descarga de efluente ocorre, simultaneamente, nos emissários de Guarujá, Santos e Praia Grande I. As figuras 7.42 (A e B) apresentam os contornos de concentrações para 1 e 18 ciclos de maré, respectivamente. É possível observar na figura que as plumas seguem em direção do mar aberto, sem retornar a costa.

A figura 7.43 mostra os contornos de concentrações (mg/L) para o quinto cenário especificado na tabela 7.14. Pode-se ver, nesse caso, que a descarga dos emissários de Guarujá e Praia Grande I e, conseqüentemente suas plumas são menores do que a de Santos, cuja pluma recircula no interior da baía e retorna parcialmente à praia, apresentando uma diluição adicional de 66,7 na baía de Santos.

Os valores de concentrações de Guarujá são muito menores, quando comparados com os valores de Santos, de modo que a escala de concentrações foi mudada na figura 7.44. Nessa figura utilizou-se o fundo de escala do valor de concentração igual a 0,0002 mg/L, sendo possível ver todas as plumas conjuntamente, observando-se que os valores de concentração na baía de Santos são iguais ou maiores do que 0,0002 mg/L.

PME5025 Fundamentos da Turbulência 2016
Prof. Jayme P. Ortiz
EPUSP

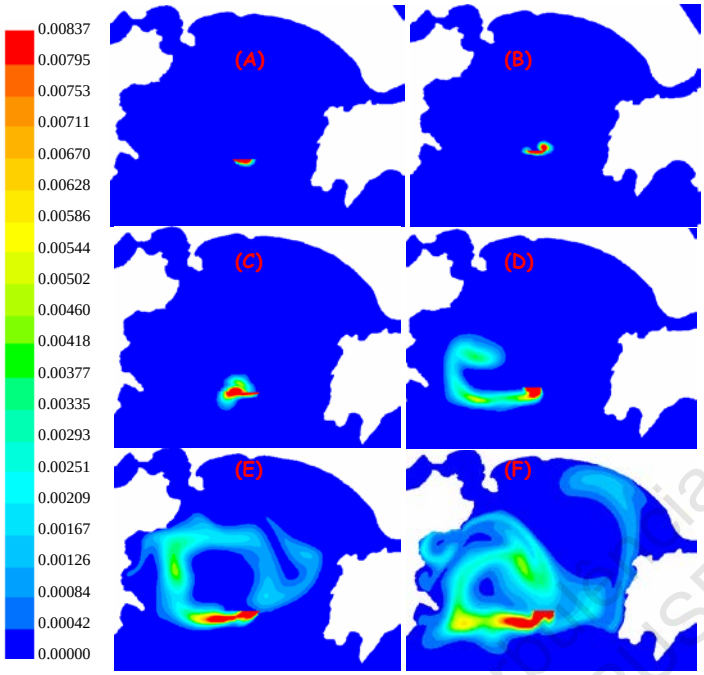


Figura 7.41. Contornos de concentração (mg/L) para o terceiro cenário, considerando os seguintes instantes do ciclo de maré: (A) 1/4; (B) 1/2; (C) 1; (D) 3; (E) 6 e (F) 12.

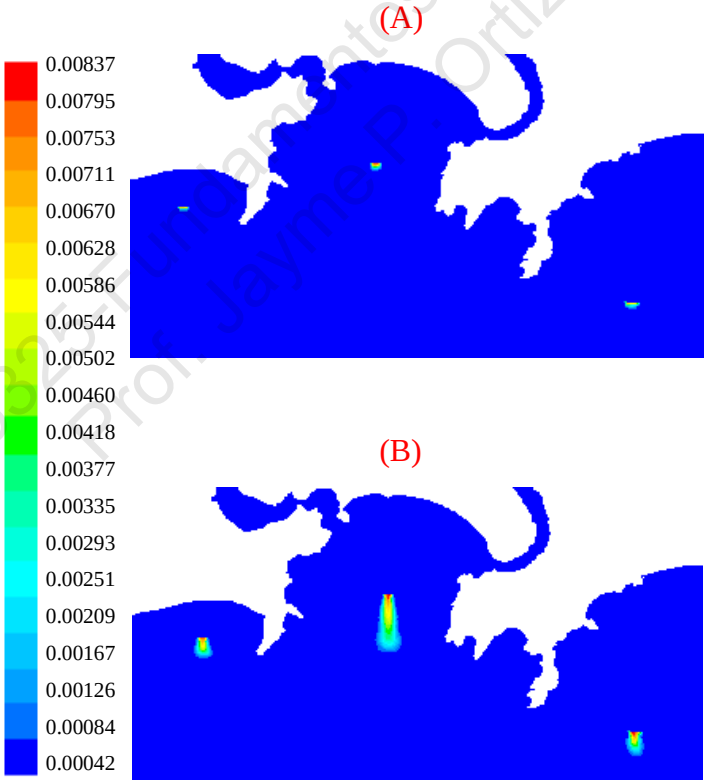


Figura 7.42.Contornos de concentração para o quarto cenário (mg/L) e para: (A) 1 e (B)18 ciclos de maré.

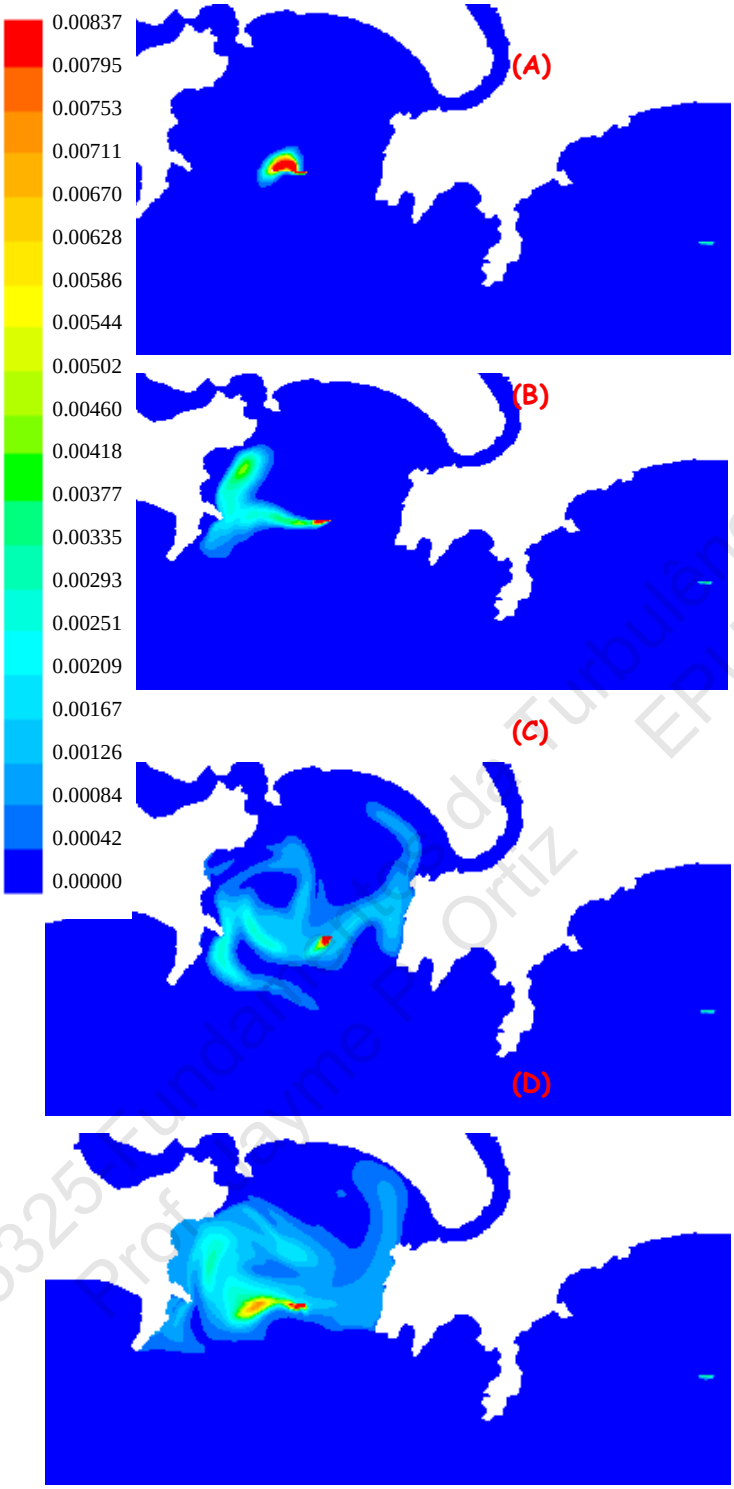


Figura 7.43. Contornos de concentrações (mg/L) para o quinto cenário e para : (A) 1; (B) 3; (C) 6 e (D) 12, ciclos de maré.

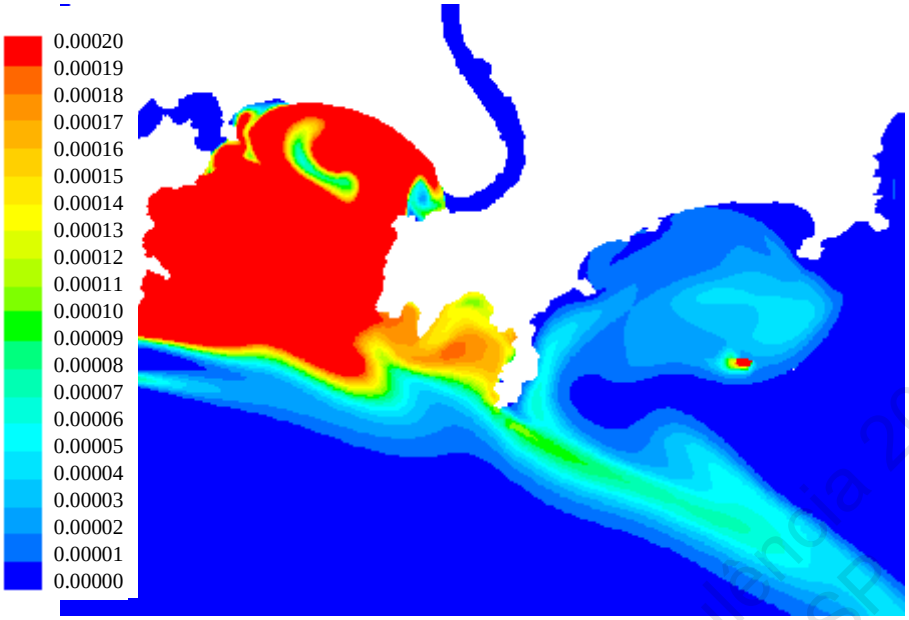


Figura 7.44. Contornos de concentrações (mg/L) para o quinto cenário e para: (A) 1; (B) 3; (C) 6 e (D) 12 ciclos de maré.

Os resultados de simulação apresentados acima mostram que o processo de dispersão da pluma no interior da baía de Santos, considerando as condições transitórias de vazão volumétrica, é fortemente afetado pelo vento, com a pluma recirculando no interior da baía. A operação conjunta dos emissários mostra que as contribuições de Guarujá e Praia Grande I são muito pequenas, quando comparadas com a contribuição do emissário de Santos. Embora a balneabilidade não seja afetada pela recirculação da pluma (zona protegida de 300 m da costa), considerando os limites estabelecidos pelos padrões de qualidade do CONAMA, é necessário melhorar o padrão de qualidade na zona de mistura, estudando alternativas de aumento do comprimento de emissário submarino de Santos.

Informações adicionais sobre as simulações aqui apresentadas podem ser encontradas em FEHIDRO (2008) e Ortiz et al (2008).

PME5825 Fundamentos da Turbulência
Prof. Jaime P. Ortiz
EPUSP 2016

7.7.7. Modelagem Computacional da Dispersão da Pluma do Efluente dos Emissários Submarinos do TEBAR – PETROBRÁS

O Canal de São Sebastião está localizado no litoral norte do estado de São Paulo. Esse canal separa o continente da Ilha de São Sebastião (Ilhabela), a segunda maior ilha do Brasil, formando uma região propícia para operações portuárias de descarga do petróleo proveniente na plataforma continental brasileira. A extensão do canal é de aproximadamente 25 km, com duas entradas de larguras aproximadas de 6 a 7 km. A porção média do canal é a mais estreita, com largura aproximada de 2 km e profundidade da ordem de 40 m. Nessa porção aumenta a velocidade da corrente, não ocorrendo, portanto, depósito de sedimentos (ARASAKI et al, 2008).

O Canal de São Sebastião contém um dos maiores terminais petrolíferos do país (Tebar – Terminal Almirante Barroso da Petrobrás – Petróleo Brasileiro S.A.). Os emissários submarinos do Tebar são formados por duas linhas separadas e independentes, construídas em PEAD – polietileno de alta densidade (figura 7.45). Cada linha tem 3 *risers* em sua extremidade, com 0,15 m de diâmetro cada e 1,5 de altura, estando as seções de saída locadas entre 19,15 m e 24,45 m de profundidade.

Figura 7.45. Representação esquemática das linhas de traçado do emissário do Tebar (FUNDESPA,2002)

7.7.7.1. Dados Ambientais e Características do Efluente de Descarga

Em campanha de campo realizada no período de fevereiro de 1994 a março de 1995 foram levantadas as condições hidrográficas e de corrente do canal de São Sebastião,

tendo-se observado grande variação espacial nos campos térmico e halino em torno da ilha de São Sebastião, particularmente no verão. Os perfis hidrográficos e de corrente dentro do canal indicam que, no verão, correntes sub-superficiais na direção norte estão associadas com a intrusão de água do Atlântico Sul através da entrada sul do canal, gerando termoclinas e haloclinas próximas do fundo; por outro lado, condições hidrográficas quase homogêneas foram observadas no inverno. Os valores extremos medidos de corrente foram de 0,90 m/s (direção norte) e 0,65 m/s (direção sul em janeiro de 1995 e março de 1994, respectivamente). De 1992 a 1993, foram analisados dados de corrente, mostrando valores de intensidades médias na direção norte de 0,40 m/s e 0,60 m/s .

A Petrobrás fez uma campanha de amostragem do efluente no período de abril de 2000 a março de 2002. Nesse período, foram encontradas altas concentrações de amônia (125,5 mg/l em abril de 2001), ultrapassando o valor limite de emissão da legislação vigente (5 mg/l). A salinidade do efluente foi da ordem de 52,8% à temperatura de 27,3 ºC para o mesmo período. A faixa de valores de densidade encontrada situou-se em torno de 1036,7 kg/m^3 (FUNDESPA, 2002) .

Esses dados serviram de base para o desenvolvimento das simulações computacionais desenvolvidas no trabalho de mestrado de Fortis, 2005.

PME5025-Fundamentos da Turbulência 2016
Prof. Jayme P. Ortiz
EPUSP

7.7.7.2. Modelo de Transporte de Espécies e de Escoamentos Reativos

Dentre os modelos eulerianos disponíveis para utilização do *software* Fluent no estudo de dispersão de efluentes, além do modelo de mistura, apresentado anteriormnte, é possível utilizar-se o modelo de transporte de espécies e de escoamentos reativos. Nesse caso, é possível modelar a mistura e o transporte de espécies químicas, resolvendo-se as equações de conservação, que descrevem a advecção, a difusão e as fontes de reações para cada espécie química. Múltiplas e simultâneas reações químicas podem ser modeladas, com as reações ocorrendo na fase principal *(bulk phase – volumetric reactions)* ou nas fases secundárias. Todavia a modelagem pode ser feita com ou sem as reações químicas.

Quando esse modelo é escolhido para resolver as equações de conservação para as espécies químicas, é possível prever-se a fração em massa local para cada espécie, *Yi*,

através da solução da equação de advecção-difusão para as i^{th} espécies. Essa equação de conservação tem a seguinte forma geral:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla(\rho \vec{V} Y_i) = -\nabla \vec{J}_i + R_i + S_i \qquad 7.91$$

Onde R_i é a taxa líquida de produção das espécies i pelas reações químicas e S_i é a taxa de criação por adição das fases de dispersão mais qualquer outra fonte disponível. Uma equação desse tipo pode ser resolvida para $N - 1$ espécies, onde: N é o número total de fases de espécies químicas presentes no sistema.

Na equação 7.91, $\overrightarrow{J_i}$ é o fluxo de difusão de espécies *i*, que aparece devido aos gradientes de concentrações. O Fluent utiliza como padrão para uma diluição aproximada, a seguinte equação:

$$\overrightarrow{J_i} = -\rho D_{i.m} \nabla Y_i \qquad 7.92$$

Onde $D_{i,m}$ é o coeficiente de difusão para espécie *i* na mistura e ρ é a massa específica do fluido da mistura. Nos escoamentos turbulentos a equação 7.92, adquire a seguinte forma:

$$\overrightarrow{J_i} = -(\rho D_{i.m} + \frac{\mu_t}{S_{ct}})\nabla Y_i \qquad 7.93$$

onde S_{ct} é o número de Schimidt turbulento $(\frac{\mu_t}{\rho D_t})$, sendo μ_t é a viscosidade turbulenta e D_t é a difusividade turbulenta. A literatura recomenda S_{ct} = 0,7 (SISSON E PITTS, 1972).

Informações detalhadas sobre a aplicação do modelo de transporte de espécies em termos do tratamento das equações da conservação (massa, quantidade de movimento e energia) podem ser encontradas em Sisson e Pitts (1972).

7.7.7.3. Criação da Geometria e Geração da Malha

A criação da geometria e a geração da malha computacional do canal de São Sebastião foram feitas usando o *software Gambit* (FORTIS,2005). Os dados batimétricos foram extraídos da carta náutica n°1643 da Marinha do Brasil. As

PME5325 Fundamentos da Turbulência 2016 Prof. Jayme P. Ortiz EPUSP

dimensões correspondentes usadas para criar a geometria e gerar a malha foram as seguintes: comprimento 915 m, largura 525 m e profundidade máxima -36 m. A representação geométrica do canal em 3D está mostrada na figura 7.46, onde, o eixo Gx corresponde a direção da velocidade de corrente; o eixo Gz corresponde a largura do canal; e o eixo Gy corresponde a altura da coluna d´água. Estabeleceram-se as seguintes características para as condições de contorno do volume de controle:

- Primeira seção transversal (lado esquerdo): velocidade de entrada;
- Última seção transversal (lado direito): velocidade de saída;
- Saídas dos difusores: velocidade;
- Nível do chão: parede;
- Lateral e superfície: condição de simetria;
- Seções transversais internas: interior

Uma malha estruturada hexahédrica foi construída para todo o canal, incluindo os contornos em torno das saídas do sistema difusor e com isso a malha 3D foi constituída de 655452 volumes. As células tem as seguintes dimensões: comprimento (Gx) e largura (Gz) igual a 1 m; altura (Gy) igual a 2,15 m. A figura7.47 apresenta o detalhamento de discretização de parte do volume de controle do canal representado.

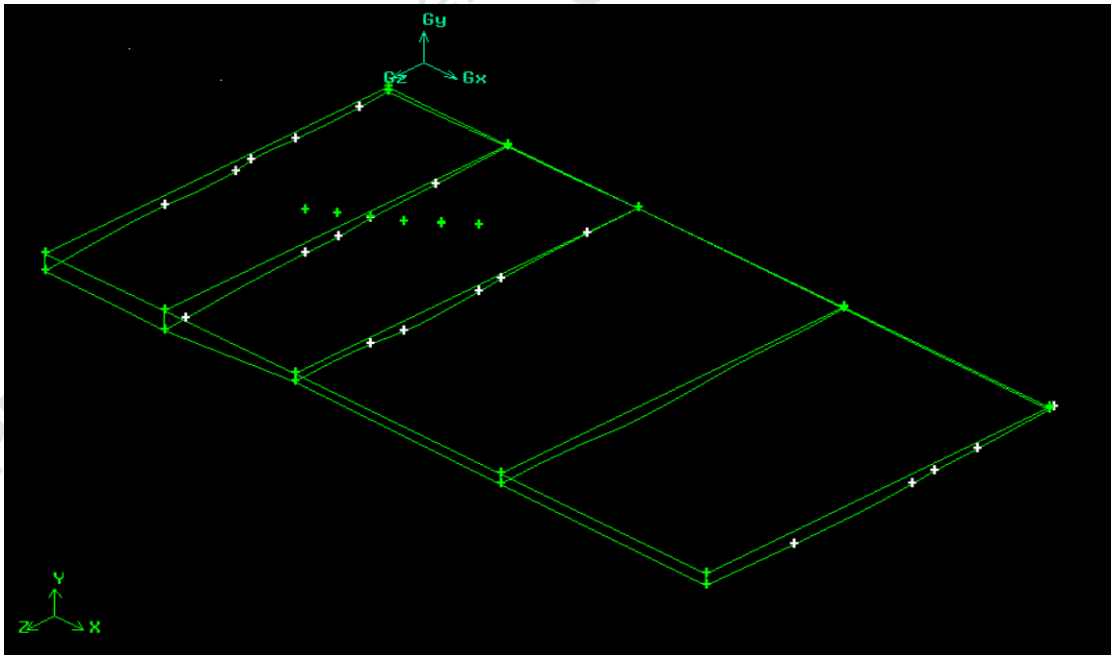


Figura 7.46. Representação em 3D do canal de São Sebastião com as saídas do sistema difusor

Princípios da Turbulência 2016 Ortiz EPUSP

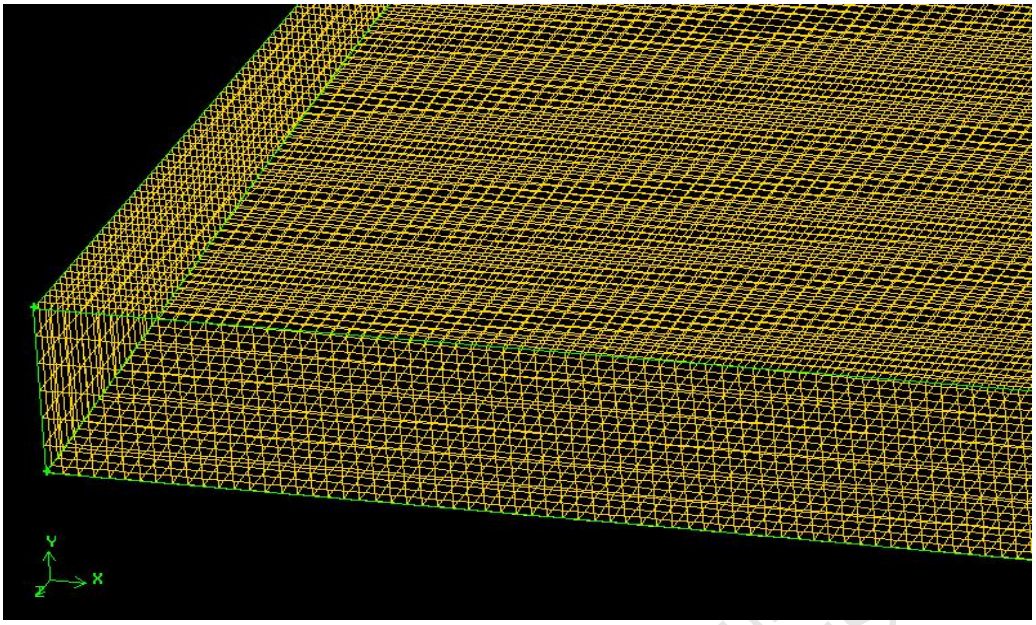


Figura 7.47. Detalhe de discretização da malha de parte do volume de controle

PME5825-Fundamentos da Turbulência
Prof. Jayme R. Ortiz
EPUSP

Um resumo dos principais parâmetros utilizados nas simulações com o *Fluent* está apresentado a seguir:

- *Fluent* – versão 6.1.22 – 3D – licença acadêmica;
- Velocidade na entrada do canal = 0,5 m/s;
- Descarga do efluente = 0,208 m^3/s;
- Modelo de turbulência k - ε;
- Solver (segregated);
- Acoplamento pressão velocidade (PISO);
- Descarga vertical com área quadrada equivalente a saída circular (diâmetro de 0,15 m);
- Fração em massa da espécie (amônia) na descarga de 0,0001205, sendo C_0 = 125.5 mg/l (amônia) e as massas específicas do efluente e da água do mar 1036,7 kg/m^3 e 1026kg/m^3, respectivamente;
- Para as simulações presentes utilizou-se um computador pessoal Pentium 4 – 1,5 GHz de processador e 1,0 GB de memória RAM.

7.7.7.4. Resultados

Fortis (2005), Fortis e Ortiz (2006) e Fortis et al (2007) apresentam resultados para diversos cenários da diluição da pluma turbulenta do Tebar comparando valores de campanhas de medição em campo com simulações feitas através dos *software Cormix e Fluent.* As simulações utilizando o modelo de transporte de espécie discutido anteriormente mostraram a possibilidade de simulação incluindo o campo próximo, a partir da utilização das condições de descarga do sistema difusor do Tebar. Os resultados apresentados a seguir são um resumo dessas simulações para as condições de contorno estabelecidas.

A figura 7.48 mostra a diluição da concentração do amônia no campo próximo, ao longo de 50 m de canal. Observa-se que o padrão de qualidade da água estabelecido no artigo 21 da resolução CONAMA 20/86 de 0,4 mg/L de amônia, representado na figura pela cor vermelha, é atendido a aproximadamente 20 m da descarga, embora ocorra um forte impacto na camada bêntica ao longo dos 915 m de canal, com a advecção da corrente atuando no processo hidrodinâmico, o que é motivado pela alta salinidade do efluente provocando o afundamento do jato/pluma.

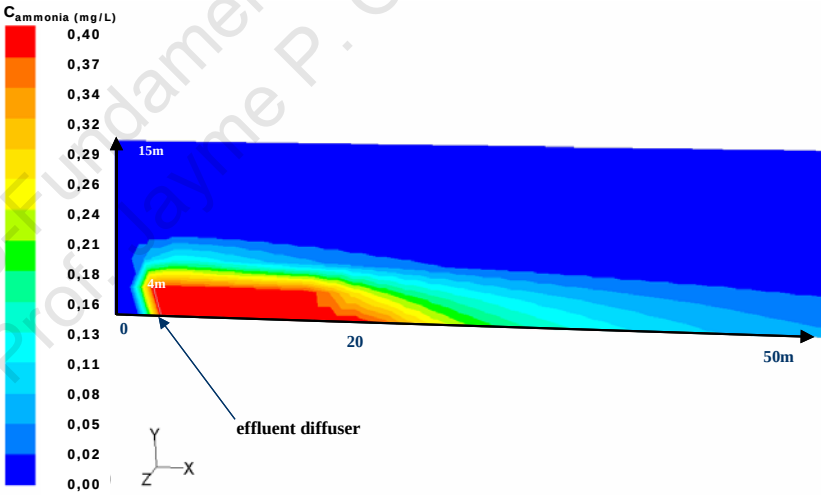


Figura 7.48. Concentração longitudinal da pluma de amônia no campo próximo.

A figura 7.49 mostra o caminhamento da pluma colada ao fundo ao longo das seis saídas do sistema difusor e no campo próximo e de transição até 915 m.

PME5325 Fundamentos da Turbulência 2016
Prof. Jayme P. Ortiz EPUSP

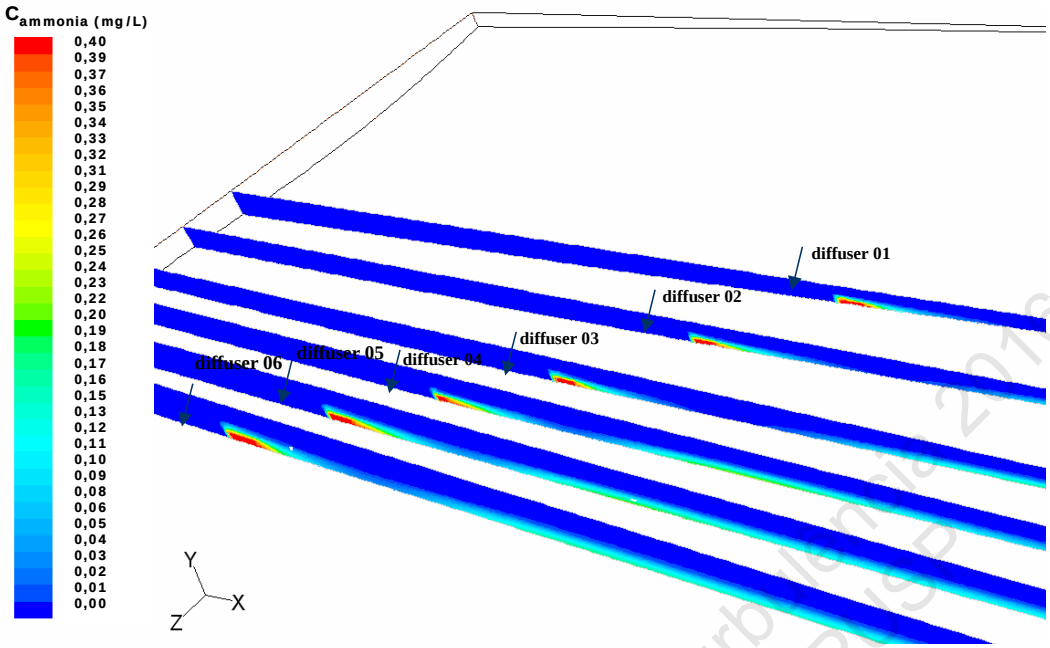


Figura 7.49. Dispersão longitudinal da pluma no campo distante ao longo das seis saídas

A figura 7.50 mostra o caminhamento da pluma no fundo do canal a partir das seis saídas do sistema difusor podendo-se verificar que a condição limite estabelecida na resolução CONAMA 20 é obtida ainda no campo próximo.

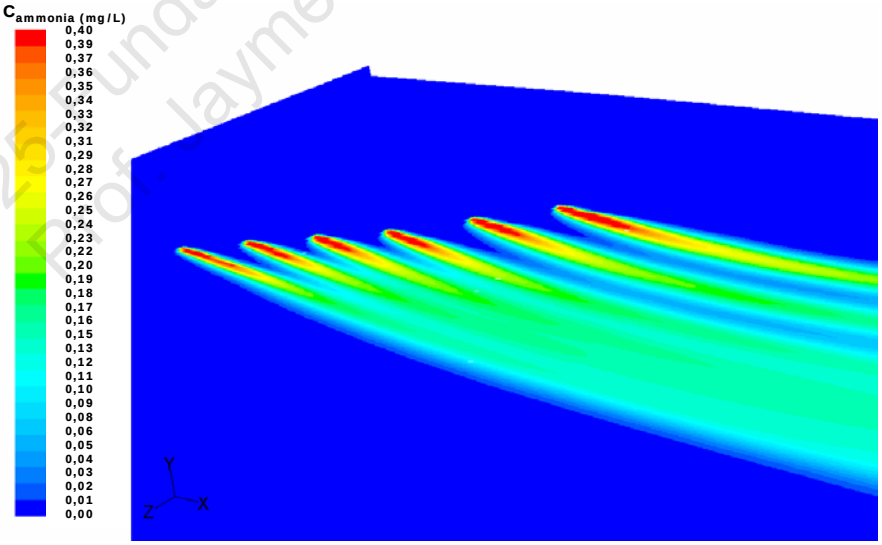
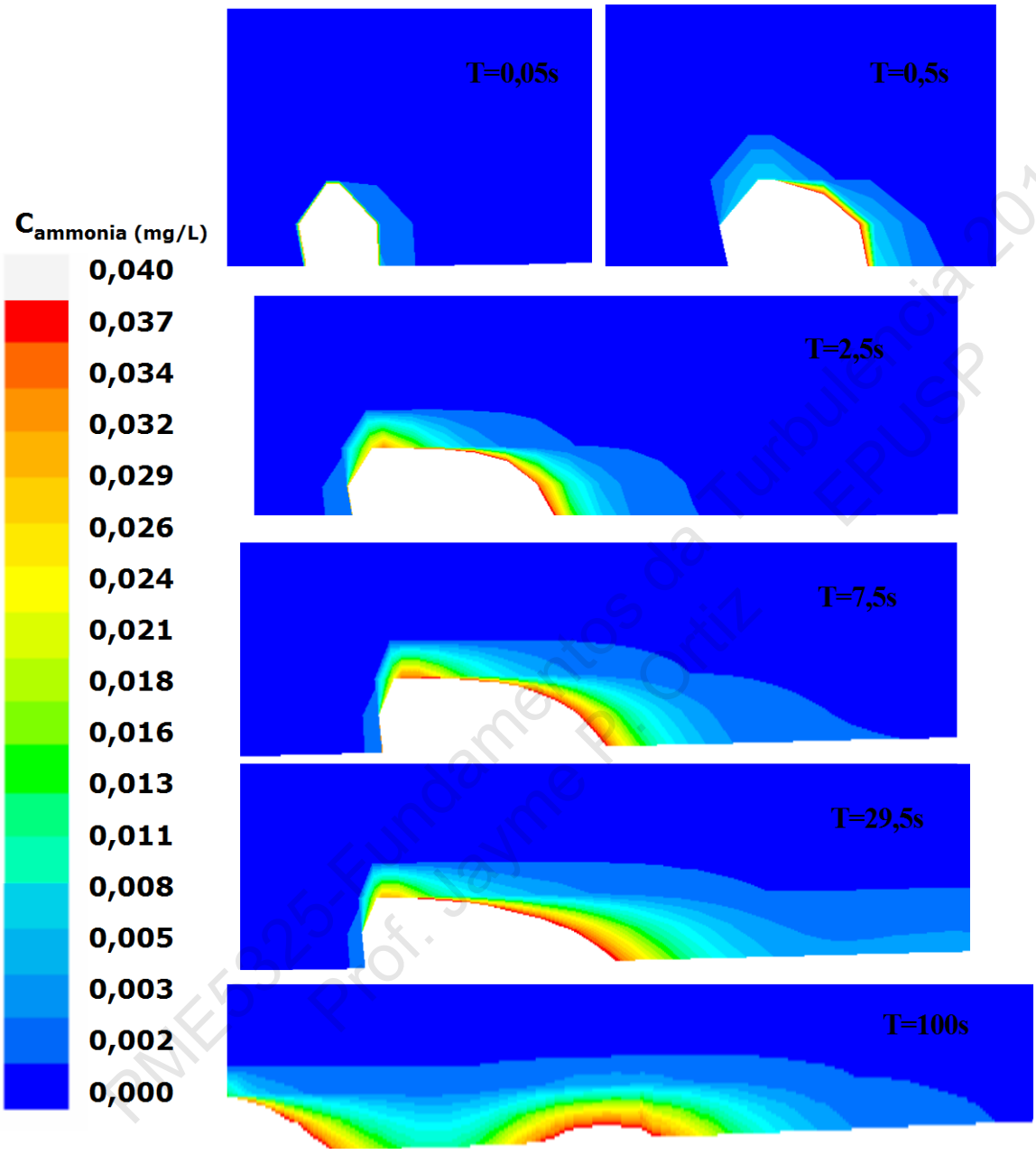


Figura 7.50. Pluma colada ao fundo no canal de São Sebastião

A figura 7.51 mostra a evolução da concentração longitudinal da pluma para diferentes instantes de tempo no campo próximo (a 100 m da descarga). Para uma

PME5325 Fundamentos da Turbulência
Prof. Jayme P. Ortiz
EPUSP 2016

melhor visualização da diluição em massa da amônia, a escala de concentração foi modificada, com a cor branca representando valores de concentração maiores ou iguais a 0,04 mg/L.



7.51. Evolução longitudinal da pluma de concentração para diferentes instantes de tempo.

A aplicação de *CFD* permite obter resultados para os campos próximo, de transição e distante, sem restrição da batimetria e da geometria do sistema difusor com suas saídas. O custo computacional é alto quando comparado com *softwares* clássicos baseados em métodos integrais gaussianos. Medições de campo são necessárias para a

validação dos resultados. A *figura 7.52* mostra resultados comparativos de diluição obtidos através da modelagem computacional utilizando os *softwares CORMIX e FLUENT* e comparando com os valores obtidos através de campanha de medição com a utilização de traçador (substância fluorescente) realizada pela FUNDESPA (2002).

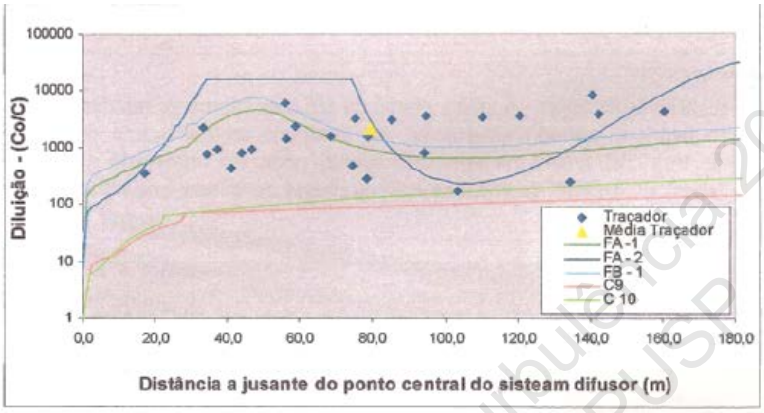


Figura 7.52 Resultados comparativos de diluição no canal de São Sebastião obtidos através de simulações computacionais (CORMIX e FLUENT) e através de campanha de medição da FUNDESPA.

As condições de contorno para as simulações com o *FLUENT* estão resumidas na tabela seguinte. Os cenários FA-1, FA-2 e FB-1 correspondem a diferenças dos volumes de controle da malha computacional utilizada (ver FORTIS E ORTIZ, 2007).

Tabela 7.16 Resumo das condições de contorno das simulações do FLUENT

Cenário	FA-1	FA-2	FB-1
Malha	1	2	1
Vazão do efluente (m^3/s)	0,208 (nominal)	0,208 (nominal)	0,128 (operacional)
Velocidade da corrente (m/s)	0,5 (sentido NE)	0,5 (sentido NE)	0,5 (sentido NE)
Densidade do efluente (kg/m^3)	1037	1037	1037
Parâmetro	Amônia	Amônia	Amônia
Concentração (mg/l)	125,5	125,5	125,5

PME5325 Fundamentos da Turbulência
Prof. Jayme P. Ortiz
EPUSP 2016

Há alguma aderência entre os resultados da campanha de medição e os resultados de simulação com o *FLUENT*. As simulações com o *CORMIX* (C9 – Vazão nominal e C10 – vazão operacional), no entanto, mostraram menores valores de diluição.

7.8. A Disposição de Efluentes Industriais Através de Descargas Fluviais Submersas – Emissários Subaquáticos

No item 7.7.4 apresentou-se o conceito de zona de mistura à luz da legislação brasileira baseada na nova resolução CONAMA 357. Nessa resolução, embora se flexibilize a descarga de efluente acima de determinados valores, aumenta-se a responsabilidade da empresa responsável no acompanhamento, controle e monitoramento desse efluente na chamada zona de mistura. Por outro lado, um novo conceito de legislação ambiental baseado no lançamento fluvial a montante da captação tem sido aplicado aos novos empreendimentos brasileiros que exigem o uso intensivo da água. Trata-se de um conceito moderno de legislação ambiental que está explícito, por exemplo, no Código Estadual de Meio Ambiente da Secretaria do Meio Ambiente do Estado do Rio Grande do Sul em seu artigo124 (SEMA, 2001) *"O ponto de lançamento de efluente industrial em cursos hídricos será obrigatoriamente situado à montante da captação de água do mesmo corpo d´água utilizado pelo agente de lançamento, ressalvados os casos de impossibilidade técnica, que deverão ser justificados perante o órgão licenciador"*.

Sreekishnan (2001) enfatiza que as indústrias de óleo, cimento, couro, têxtil, aço, papel e celulose, potencialmente, são aquelas que podem causar uma maior poluição ambiental. O uso intensivo da água por essas indústrias é função da capacidade produtiva das mesmas, da matéria prima disponível, do produto acabado e do reuso da água. As agências de proteção ambiental têm uma maior preocupação quando o efluente dessas indústrias é descarregado em cursos d´água. Existe, portanto, um compromisso: investimento no tratamento terrestre *versus* capacidade de diluição do efluente usando sistemas difusores subaquáticos. Nesse sentido, com o lançamento a montante, garante-se o interesse não só do órgão ambiental em estabelecer os padrões de qualidade dentro

PME3425-Fundamentos da Turbulência 2016
Prof. Jayme P. Ortiz EPUSP

da zona de mistura, mas também o interesse do empreendedor, que tendo a necessidade de uso intensivo da água, deve garantir sua qualidade na seção de captação.

As grandes indústrias, particularmente as de papel e celulose que tem expandido sua produção no país, têm procurado se adaptar a essa nova legislação.

Apresenta-se a seguir o estudo de caso da Veracel Celulose S.A., cujos resultados foram parcialmente divulgados no congresso da IAHR de 2007 (ORTIZ E BESSA, 2007).

7.8.1. O Estudo de Caso da Veracel Celulose S.A.

A Veracel Celulose S.A. instalou, no sul do estado da Bahia, um complexo industrial para produção de celulose, tendo em conta as vantagens oferecidas de clima e a facilidade de uso da água do Rio Jequitinhonha.

O Rio Jequitinhonha origina-se no estado de Minas Gerais e seu comprimento total é de aproximadamente 1080 km, dos quais, somente 160 km no estado da Bahia. Na região de interesse de implantação da fábrica, o rio se caracteriza por um acentuado trecho em meandros com formação de bancos de areia e mudança de seu curso, particularmente no período de seca. Duas usinas hidrelétricas foram construídas a montante das instalações da Veracel (Itapebi e Irapé), mudando a morfologia do rio e seu regime hidrológico. A usina de Itapebi tem uma capacidade de geração de 450 MW e deve garantir a vazão mínima sanitária a jusante de 40 m^3/s.

A preocupação da Veracel Celulose S.A. manifesta-se no sentido de se desenvolver um projeto de um sistema difusor subaquático para a descarga do efluente e de um sistema de tomada d´água para o novo empreendimento, à luz do novo conceito de lançamento a montante da captação, lembrando que o Rio Jequitinhonha, no trecho de interesse, é considerado de classe II, de acordo com as resoluções CONAMA 20 e 374.

7.8.2. Campanhas de Medição de Campo

PME5025-Fundamentos da Turbulência 2016
Prof. Jayme P. Ortiz
EP USP

No período de 16 a 18 de outubro de 2002, a Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica – FCTH organizou, sob contrato com a Veracel Celulose S.A., a campanha de medição de campo na área de interesse, incluindo: o reconhecimento da área para a definição prévia das seções da descarga do efluente e da tomada d´água; medidas de batimetria; medidas de vazão volumétrica; amostragem de sedimentos; amostragem da qualidade da água; determinação da declividade média do trecho de interesse do rio (FCTH – Relatório 2, 2003). Esses dados foram usados no estudo hidrodinâmico e de estabilidade do leito do rio, além do estudo de diluição do efluente, com o objetivo de se desenvolver o projeto básico do sistema difusor do empreendimento da Veracel. As seções batimétricas foram escolhidas levando em conta um estudo prévio da empresa de consultoria Jaako Poyry, considerando o comprimento total da zona de interesse de 2200 m (FCTH – Relatório 3, 2003). As medições de campo forneceram os dados de entrada para o modelo computacional de dispersão da pluma e que foi utilizado para o trabalho de concepção do projeto básico do sistema difusor da Veracel Celulose S.A.

A figura 7.53 foi reproduzida a partir das seções batimétricas levantadas no Rio Jequitinhonha no trecho de interesse, com a descarga do efluente a ser instalada a montante (próxima da seção 1) e a tomada d´água a ser instalada a jusante (próxima da seção 8). É possível verificar-se na figura a formação de um banco de areia entre as seções 7 e 8. A geometria da figura 7.53 foi base para as simulações computacionais realizadas. Uma vazão volumétrica de 76 m^3/s foi medida e a declividade média do rio obtida foi de 7,15 m/m (FCTH – Relatório1, 2002 e Relatório 2, 2003).

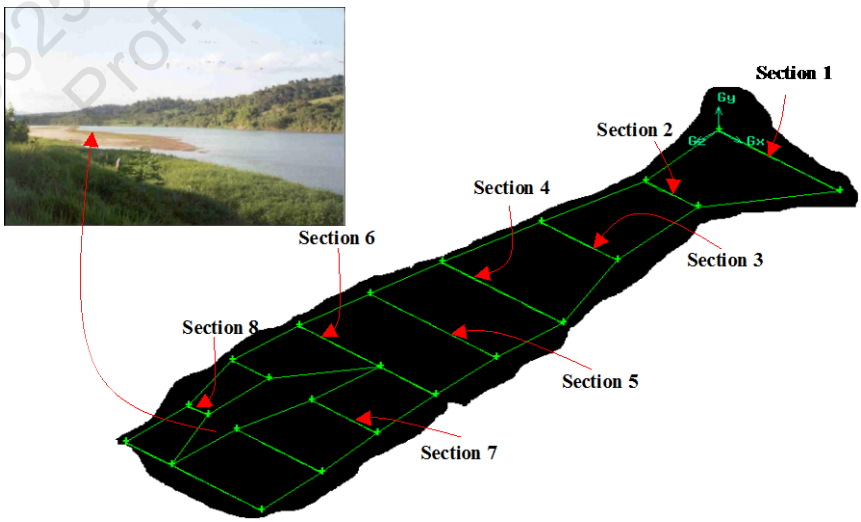


Figura 7.53. Geometria do Rio Jequitinhonha no trecho de interesse, a partir dos levantamentos batimétricos.

PME5325-Fundamentos da Turbulência 2016
Prof. Jayme P. Ortiz
EPUSP

7.8.3. Simulações Computacionais

Inicialmente, diversos cenários foram simulados aproximando-se a batimetria para um canal retangular com largura e profundidade média calculadas a partir dos dados e considerando as vazões volumétricas de 76 m^3/s e de 40 m^3/s. As simulações foram feitas para descarga de efluente de 1; 2,1 e 3,2 m^3/s, considerando descargas de saída simples e de saídas múltiplas de sistemas difusores e considerando temperaturas de descarga de 37°C e 25°C (igual a temperatura do rio). Adotou-se para a concentração de descarga do efluente, baseada no parâmetro *cor*, o valor C_0 = 1111 mgPt/L, que foi fornecido pela Veracel. Essas simulações iniciais foram feitas baseadas em modelos gaussianos , como é o caso do CORMIX, calculando-se as concentrações ao longo do eixo da pluma (STRETEER et al, 1998; POTTER et al, 1997 and JIRKA & AKAR, 1991).

As simulações prévias mostraram a necessidade de se projetar um sistema difusor de múltiplas saídas, que garantisse uma diluição mínima já no campo próximo, compatível com as velocidades de descarga, sugerindo-se um sistema com três módulos difusores contendo cada um 15 *risers*, com saídas horizontais circulares de diâmetro 0,15 m e espaçadas de 2,0 m. Tomando por base essa solução partiu-se para simulações mais refinadas utilizando a técnica *CFD*, através do *software Fluent* e do modelo de mistura já apresentado anteriormente.

A malha computacional foi traçada para a geometria 3D do Rio Jequitinhonha, representada na figura 7.53. O sistema difusor foi fixado entre as seções 1 e 2 , com o seu início a 40 m da margem direita, de modo a preservar um canal de navegação nessa margem. A figura 7.54, mostra a representação dos 3 módulos.

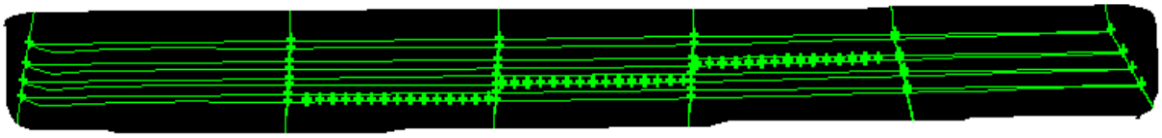


Figura 7.54. Representação esquemática dos três módulos do sistema difusor com um total de 45 orifícios de saídas horizontais.

PME5325-Fundamentos da Turbulência 2016 Prof. Jayme P. Ortiz EPUSP

Uma malha híbrida 3D não estruturada foi construída para todo o trecho de rio, incluindo os contornos em torno das saídas do sistema difusor, totalizando 1626493 volumes. A figura 7.55 mostra um detalhamento da discretização da malha nas proximidades das saídas do sistema difusor. Estabeleceu-se como condições de contorno para o modelo: velocidade do rio na seção1 de entrada; velocidade de saída na seção 8; velocidades nas saídas dos orifícios do sistema difusor; fundo (condição de parede); superfície (condição de simetria); seções transversais internas (interfaces).

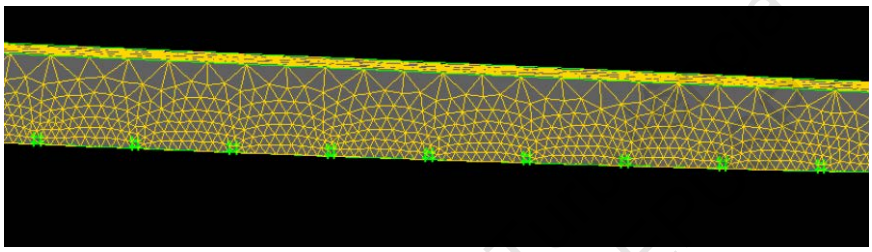


Figura 7.55. Detalhe da discretização da malha na região próxima as saídas do sistema difusor.

7.8.4. Resultados

Apresenta-se a seguir um resumo dos dados de entrada das simulações com o *Fluent*:

- Trecho de simulação: da seção 1 a seção 4;
- Simulação com a batimetria levantada e considerando sistema difusor com três lances de 15 orifícios cada;
- Vazão do rio Q_{rio} = 76 m³/s e 30 m³/s;
- Vazão do efluente Q_{ef} = 1,85 m³/s;
- Temperaturas do rio e do efluente 25ºC;
- Massa específica da água = 998 kg/m^3;
- 45 orifícios com d = 15 cm;
- Parâmetro de concentração baseado na cor Co = 1111 mg/ml.
- Modelo de turbulência k-ε;

PME5825-Fundamentos da ... 2015
Prof. Jayme P. Ortiz

- Acoplamento pressão/velocidade algorítmo SIMPLE;
- Descarga horizontal com área quadrada equivalente a saída circular de 0,15 m de diâmetro;
- Fração em volume do efluente (cor) de 0,001113, considerando Co = 1111 mg/ml;
- Simulações com o *Fluent* – version 6.2.16 (utilizando-se um computador pessoal Pentium 4 – 3,2 GHz e 3,5 GB de memória RAM).

A figura 7.56 mostra o campo de concentrações na superfície livre para as vazões de 76 e 30 m³/s, podendo-se observar o caminhamento da pluma e a preservação do canal de navegação junto a margem direita. A figura 7.57 mostra o mesmo campo a 1 m de profundidade. As partes pretas nas figuras correspondem ao afloramento do leito rochoso nas regiões de baixa profundidade.

A figura 7.58 mostra os vetores de velocidade na saída dos orifícios do sistema difusor.

Os resultados obtidos com o *Fluent* mostram que não há restrição da batimetria e da geometria do sistema de descarga para a simulação de concentrações dos parâmetros do efluente nos campos próximo, de transição e distante. O custo computacional, todavia, é alto, quando comparado com os métodos integrais baseados na hipótese gaussiana. Os resultados mostraram que a resolução CONAMA 20 foi atendida na zona de mistura (C = 0,4mg/L) , embora, um forte impacto na camada bêntica ocorre ao longo dos 915 m de extensão, sendo a concentração no final dessa distância, em torno de 0,04mg/L.

PME5325 Fundamentos da Turbulência 2016
Prof. Jayme P. Ortiz EPUSP

(A) (B)

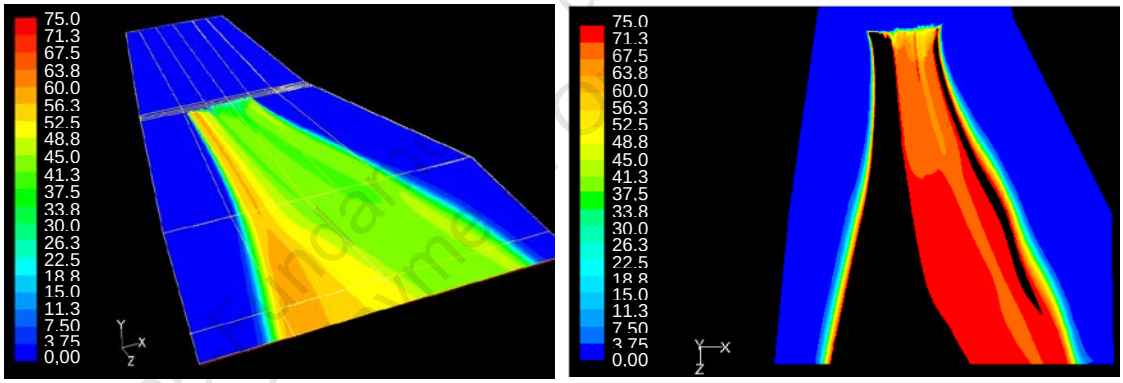


Figura 7.56 Vista na superfície do campo de concentrações entre as seções 2 e 5 (550 m)

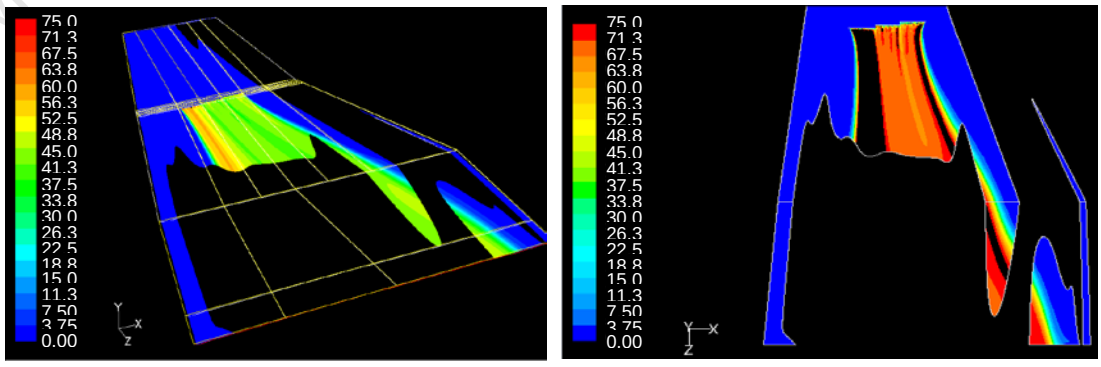


Figura 7.57. Vista do campo de concentrações entre as seções 2 e 5 (550 m) a 1 m de profundidade: A) Q_{rio} = 76 m^3/s; B) Q_{rio} = 30 m^3/s.

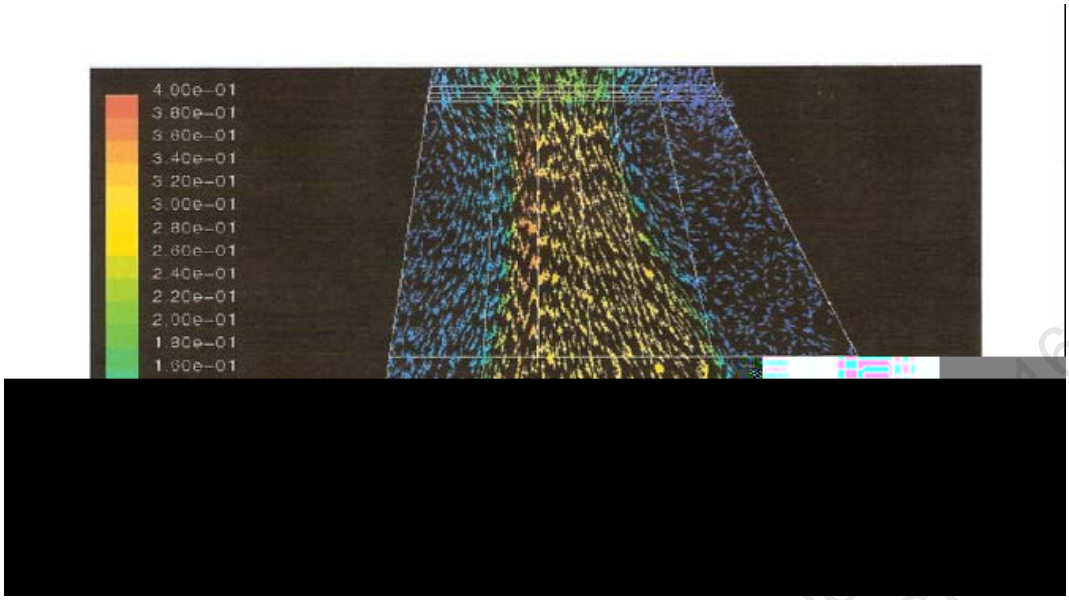


Figura 7.58 Vetores de velocidade na saída dos orifícios do sistema difusor.

Os resultados obtidos com o *Fluent* mostram que não há restrição da batimetria e da geometria do sistema de descarga para a simulação de concentrações dos parâmetros do efluente nos campos próximo, de transição e distante. O custo computacional, todavia, é alto, quando comparado com os métodos integrais baseados na hipótese gaussiana. Os resultados mostraram que a resolução CONAMA 20 foi atendida na zona de mistura (C = 0,4mg/L) , embora, um forte impacto na camada bêntica ocorre ao longo dos 915 m de extensão, sendo a concentração no final dessa distância, em torno de 0,04mg/L.

PME5325-Fundamentos da Turbulência
Prof. Jaime P. Ortiz EPUSP 16