

**III SIMPÓSIO LUSO-BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL
(SILUBESA)**

TEMA 2

SISTEMAS DE COLECTA, TRATAMENTO E DISPOSIÇÃO FINAL DE ESGOTOS

SISTEMAS DE DESCARGAS DE EFLUENTES TÉRMICOS EM MEIO HÍDRICO

* Mário Augusto Tavares Russo ** Maria Emilia Cascaes *** Marçal Teixeira de Gouveia
**** Mário Jorge Valente Neves

* Assistente da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Viana do Castelo, Portugal

** Assistente do Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, Portugal

*** Engenheiro Civil - Direcção Geral dos Recursos Naturais, Braga, Portugal

**** Doutor em Eng. Civil, Prof. Auxiliar da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal

RESUMO

O presente trabalho começa por abordar questões ambientais relacionadas com a descarga de águas quentes em meio hídrico, referindo alguma legislação sobre a matéria. Analisam-se depois sistemas de descarga superficiais e submersos, apresentando-se alguns exemplos simples sobre o estudo do campo de temperaturas.

1. - Natureza do Problema

1.1- O problema da descarga de águas quentes em meio hídrico está relacionado, fundamentalmente, com os circuitos de refrigeração de unidades industriais e centros produtores de energia, designadamente, centrais térmicas e nucleares.

Em geral, é o campo de temperaturas induzidas no corpo receptor, o objecto de maior atenção, quer por razões económicas relacionadas com efeitos de recirculação, quer por questões de natureza ambiental.

Os sistemas de refrigeração são basicamente realizados em circuito fechado - caso das lagoas e torres de refrigeração, com transferências de calor directamente com a atmosfera - e os sistemas abertos - que são normalmente os casos das centrais, compreendendo uma ou mais tomadas de água, transporte até aos órgãos da central e sua restituição.

1.2. De facto, a água utilizada nos circuitos de refrigeração é frequentemente captada no mesmo meio onde se processa a restituição. Quanto maior a sua temperatura, maior o caudal a derivar, com repercussões nos custos de instalação e exploração. Interessa, por isso, minimizar os efeitos de recirculação, objectivo geralmente procurado através do afastamento entre locais de tomada e de descarga (o que aumenta a extensão dos circuitos) e adopção de sistemas de descarga que reduzam quanto possível o aquecimento do corpo receptor.

Comparativamente, os custos de sistemas fechados são mais elevados que os de sistemas abertos (cerca de 15 vezes superior) - **Neves - (1985)**.

Para se ter uma ideia dos caudais envolvidos, pode dizer-se que para cada **MW** instalado são necessários **0.03 a 0.06m³/s**, o que, para uma central nuclear de **1000 MW** de potência, corresponderia a um caudal de refrigeração da ordem dos **30 a 60 m³/s**, equivalente ao dobro do caudal médio anual de um rio como o Ave (Portugal).

1.3. Um apuramento categórico das implicações das descargas térmicas sobre a degradação dos meios receptores naturais não se tem revelado fácil, talvez porque o problema apareça geralmente associado com poluição orgânica e química.

No entanto, é possível identificar efeitos de natureza física, química e biológica, nos quais se incluem a elevação da temperatura do meio, diminuição da densidade e viscosidade, redução do teor de oxigênio dissolvido, aceleração de reacções químicas e a possibilidade de alterações no metabolismo, reprodução e crescimento das espécies aquáticas. A conjugação destes factores, aliada à interdependência das espécies, pode conduzir a alterações dos ecossistemas, cuja amplitude dependerá, naturalmente, das características das fontes poluidoras e da capacidade de refrigeração dos meios receptores.

1.4. Um interessante resumo de estudos efectuados em França sobre as implicações ambientais da rejeição de efluentes de centrais térmicas em rios é apresentado numa publicação da *Direction des Etudes et recherches d'Electricité de France* (1980). À data da sua elaboração, a legislação francesa impunha um limite máximo de 30^oC à temperatura dos efluentes. Numa apreciação global, o relatório não revela pessimismo, nem mesmo quando analisa as consequências sobre os rios Loire, Sena e Mosela durante a excepcional estiagem de 1976, em que os caudais daqueles rios nas proximidades das zonas de descarga se reduziram a 36, 25 e 3 m³/s, respectivamente; acresce que, por razões económicas, tinham sido autorizadas, a título excepcional, descargas com temperaturas superiores a 30^oC. Transcrevem-se algumas conclusões do referido estudo: "... nada de muito notório resultou destas temperaturas extremas, nenhuma mortalidade de peixes foi observada por esse efeito, os teores de oxigênio dissolvido não foram afectados, os fenómenos de eutrofização não foram significativamente ampliados".

Reconhece-se, no entanto, que se trata de matéria controversa e já nos Estados Unidos, por exemplo, parece suscitar grande preocupação, a ponto de fortes restrições terem sido impostas às descargas térmicas.

1.5. Em matéria de legislação na Comunidade Económica Europeia, a publicação atrás referida menciona a Directiva CEE nº L 194 de julho de 1975, que impõe um máximo de 25°C nas tomadas de águas superficiais destinadas a consumo público e a Directiva CEE nº L 222 de 18 de julho de 1978, segundo a qual nas águas designadas pelos Estados Membros como tendo necessidade de ser protegidas para a vida dos peixes, o aquecimento provocado por descargas térmicas não deve, após mistura, ultrapassar 3°C nas classificadas como "ciprinícolas" e 1,5°C nas "salmonícolas"; esta directiva refere ainda, que após mistura, a temperatura a jusante do local de descarga não deve ultrapassar 28°C ou 21°C durante mais de 2% do tempo, conforme as águas sejam classificadas na primeira ou segunda categoria.

Aos Estados Membros foi concedido um prazo de dois anos para estabelecerem aquelas classificações, devendo em seguida aplicar as regras comunitárias num prazo de cinco anos para a L 222 e 10 anos para a L 194.

Anteriormente a estas Directivas, em Espanha, por exemplo, os rios eram classificados em três grupos: protegidos, controlados e normais. As limitações incidiam na temperatura após mistura e no teor mínimo de oxigénio:

- rios protegidos, $T_{m\acute{a}x} = 25^{\circ} \text{C}$ e $5 \text{ mg } \text{O}_2 / \text{L}$.
- rios controlados, $T_{m\acute{a}x} = 25^{\circ} \text{C}$ e $3 \text{ mg } \text{O}_2 / \text{L}$.
- rios normais, $T_{m\acute{a}x} = 30^{\circ} \text{C}$ e $1 \text{ mg } \text{O}_2 / \text{L}$.

Em Portugal parece estar previsto impôr um limite de 3°C (como média de 30 dias consecutivos) ao aumento de temperatura nos meios hídricos provocados por descargas industriais.

2 . Descargas Superficiais

2.1. As descargas dos efluentes podem ser superficiais ou submersas. No seu estudo têm sido utilizados modelos matemáticos baseados nas equações de movimento, complementadas por hipóteses adicionais de natureza diversa (em geral incidindo nos mecanismos globais de arrastamento do fluido ambiental - métodos integrais - ou na estrutura fina da turbulência, nos métodos diferenciais) e modelos físicos apropriados em observações laboratoriais e de campo, cujos resultados se tem procurado enquadrar e generalizar por considerações de natureza dimensional.

Aturado trabalho experimental, combinado com a utilização de métodos integrais permitiu a **Jirka et al (1981)** formular uma interessante metodologia de cálculo para descargas superficiais, com utilidade prática para a análise sumária de algumas situações.

2.2. Considere-se inicialmente o caso representado na fig. 1, relativo a uma descarga em águas profundas (conceito a precisar mais adiante) e em repouso .

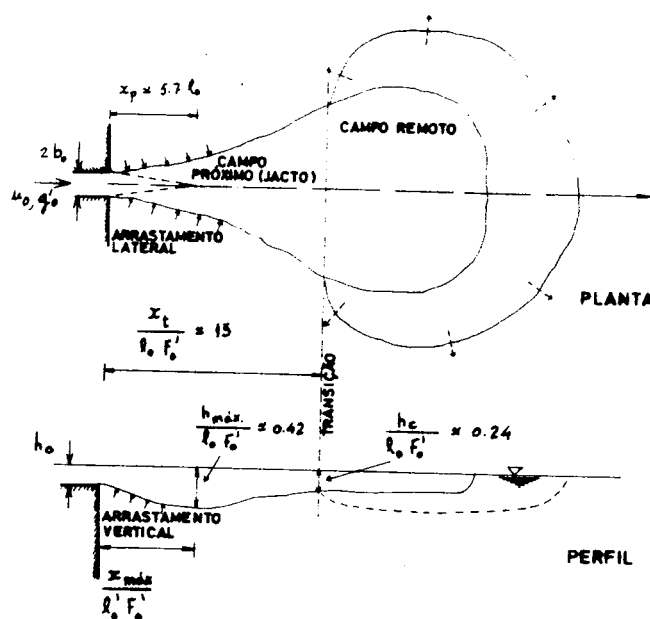


Fig.1 - Estrutura de um jacto quente superficial em águas profundas e em repouso

Diferentes mecanismos comandam o escoamento à medida que aumenta a distância à origem, o que leva à consideração de um "campo próximo" (near-field) e um "campo remoto" (far-field).

No campo próximo são inicialmente preponderantes as forças de inércia e o jacto começa por se expandir em virtude da sua acção no arrastamento do fluido circundante. Entretanto a velocidade diminui e as forças de inércia perdem significado relativamente às forças de gravidade associadas às diferenças de densidade dos dois fluidos, as quais promovem um movimento ascensional, adelgacando o jacto e intensificando o seu espalhamento lateral.

O campo próximo manifesta um comportamento característico dos jactos, podendo ser estudado à luz das teorias sobre estes escoamentos. Nele se produz significativa mistura com o fluido ambiental, com conseqüente atenuação dos efeitos de inércia e densimétricos, que passam a ser contrabalançados por acções interfaciais ao nível da superfície e do fundo da camada. Resulta assim, no campo remoto, um escoamento praticamente horizontal, caracterizado por uma expansão lenta e passiva em todas as direcções, embora correntes ambientais muito ligeiras sejam suficientes para determinar formas preferenciais de desenvolvimento.

2.3. É no campo próximo, cuja extensão é condicionada pela geometria da origem e pela dinâmica das forças em presença (fig. 1), que se desenvolve praticamente todo o processo de mistura, o que justifica uma atenção especial.

Para valores de h_0/b_0 compreendidos entre 0.1 e 2 (h_0 =altura da lâmina líquida na origem; b_0 =semi-largura do canal) **Jirka et al (1981)** consideram que os parâmetros apropriados para o estudo do escoamento são uma escala de comprimentos (l_0),

$$l_0 = (h_0 b_0)^{1/2} \quad (1)$$

e um número de Froude densimétrico (F'_0), traduzindo a importância relativa entre forças de inércia e forças de gravidade;

$$F'_0 = u_0 / (g'_0 l_0)^{1/2} \quad (2)$$

onde u_0 representa a velocidade de descarga e $g'_0 = \left(\frac{\rho_0 - \rho_a}{\rho_a}\right)g$ a chamada "aceleração aparente" (ρ_0 = massa específica de jacto na origem; ρ_a = massa específica do fluido ambiental; g = aceleração da gravidade).

A fig. 1 quantifica algumas características geométricas de escoamento através de l_0 e F'_0 .

As temperaturas máximas localizam-se à superfície e ao longo do eixo. Em face dos resultados experimentais coligados por **Jirka et al (1981)** e **Brocard (1984)**, parece razoável considerar para efeitos de cálculo a seguinte expressão empírica - **Neves (1987)**:

$$\Delta T_m / \Delta T_0 = (1 + F'^0_0)^{1/2} [\exp (5.7 - (x / l_0) / 3.5 F'_0) - 1] \quad (3)$$

$\Delta T_m = T_m - T_a$ e $\Delta T_0 = T_0 - T_a$ representam excesso de temperatura relativamente às águas ambientais (os índices m , g e a referem-se ao eixo, origem e ambiente, respectivamente).

A equação (3) só deverá ser aplicada fora do núcleo potencial, zona restrita onde não há mistura com o fluido ambiental, mantendo-se aí a temperatura com o valor inicial T_0 ; a extensão do núcleo potencial (x_p) é da ordem de $5.7 l_0$ a $8 l_0$.

Considerando a analogia normalmente existente nos jactos quanto à distribuição de grandezas escalares, sejam elas temperatura ou substâncias dissolvidas, a equação (3) será, em princípio, também aplicável ao estudo das concentrações dessas substâncias.

2.4. A matéria exposta dizia respeito à descarga em águas profundas, onde é razoável menosprezar a influência dos fundos. **Jirka et al (1981)** referem como critério para tal classificação a relação $h/H < 0.75$, onde h representa a espessura prevista para o jacto de acordo com a fig. 1 e H a profundidade do corpo receptor.

Não se verificando tal relação, há que contar com o efeito inibidor dos fundos sobre o processo de arrastamento, diminuindo a diluição. Nessas circunstâncias, será de multiplicar o valor de ΔT_m calculado para águas profundas pelo factor

$$f = [(h/H)_{\max} / 0.75]^{0.75} \quad (4)$$

Jirka et al (1981) fornecem ainda alguns elementos práticos para estudos preliminares de jactos superficiais sujeitos a correntes ambientais; referindo que, para correntes moderadas em águas profundas, não há diferenças muito substanciais, no comportamento do campo próximo, relativamente às águas em repouso.

2.5. Como exemplo, considere-se o caso de uma indústria que descarrega um caudal de 300 l/s à temperatura de 32°C através de um canal com 0.80 m de largura, sendo de 0.50m a altura do escoamento. O meio receptor encontra-se praticamente em repouso, a profundidade é da ordem dos 4 metros e a temperatura 17° C. Pretende-se estudar as temperaturas máximas, induzidas no meio receptor.

Resolução

a) Definição dos parâmetros de cálculo

$$b_0 = 0.80/2 = 0.40\text{m}; \quad h_0 = 0.50\text{m}$$

$$l_0 = (0.40 \times 0.50)^{1/2} = 0.45\text{m}; \quad u_0 = 0.300 / (0.80 \times 0.50) = 0.75 \text{ m/s}$$

A consulta de tabelas para a densidade da água em função da temperatura conduz a

$$(\rho_a - \rho_0) / \rho_a = 0.0036, \text{ pelo que a aceleração aparente vale}$$

$$g'_0 = 0.0036 \times 9.8 = 0.035 \text{ m/s}^2.$$

$$F^*_0 = 0.75 / \sqrt{0.035 \times 0.45} = 6.0$$

b) Verificação da influência dos fundos

$$b_{\text{máx}} = 0.42 l_0 F^*_0 = 1.13\text{m}$$

$$b_{\text{máx}} / H = 1.13 / 4 < 0.75 \text{ (não há influência).}$$

c) extensão de núcleo potencial

$$x_p = 5.7 l_0 = 2.57 \text{ m}$$

d) Cálculo das temperaturas na região central

Aplicando a eq. (3) obtém-se a variação do excesso de temperatura (ΔT_m) com a distância à origem (x). A temperatura $T_m = 17 + \Delta T_m$ teria a variação indicada na fig. 2.

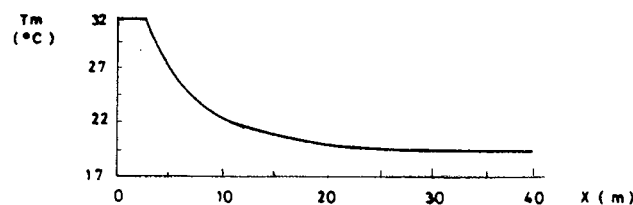


Fig. 2 - variação da temperatura máxima com a distância à origem.

3. Descargas Submersas

3.1. As cargas submersas permitem uma mistura mais eficiente do efluente com o meio receptor, designadamente quando se processam através de difusores funcionando pelo princípio dos jactos múltiplos. (fig.3)

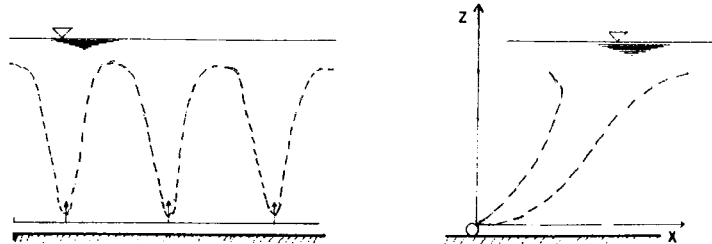


Fig.3- Sistema de jactos múltiplos submersos

Nalgumas situações é possível uma abordagem teórica relativamente simples, como é o caso dos jactos descarregados sem interferências em águas profundas tranquilas. desenvolvendo o conceito de arrastamento originalmente introduzido por Morton et al (1956), porém relacionando o fenómeno com o tipo de forças que comandam o escoamento (forças de inércia nas proximidades da origem, forças de gravidade em regiões afastadas) Neves (1985) concluiu que o comportamento de jactos verticais com densidade diferente da do ambiente podia ser sintetizado pela expressão

$$G / G_0 = (G / G_0)_j (1 + A)^n \quad (5)$$

Onde G_0 representa o valor de uma grandeza genérica na origem (p.ex, velocidade, caudal, excesso de temperatura ou concentração de substâncias dissolvidas), G o seu valor máximo ao nível Z , e A um parâmetro adimensional traduzindo a importância relativa entre forças de inércia e forças de gravidade a esse nível. Para jactos circulares

$$A = 0,282 (Z / F_0 D)^2 \quad (6)$$

sendo:

D - o diâmetro de orifício

F_0 - um número de froude densimétrico definido por

$$F_0 = u_0 / (g'_0 D)^{1/2} \quad (7)$$

onde u_0 é a velocidade na origem e g'_0 a aceleração aparente.

O expoente n que intevém na eq. (5) varia conforme a grandeza em questão; para o caso que agora interessa, excesso de temperatura (ΔT_m), o expoente vale $-1/3$.

$$(G / G_0)_j = (\Delta C_m / \Delta C_0)_j = 5,42 (Z/D)^{-1} \quad (8)$$

* No trabalho original F_0 é definido pelo quadrado desta expressão, o que tem vantagens quando se lida com jactos mais densos que o ambiente, caso em que g'_0 é negativo. Aqui, por questão de uniformidade, optou-se por manter a definição utilizada por outros autores citados.

As constantes intervenientes nas equações anteriores foram calculadas a partir do coeficiente de arrastamento para jactos puros ($\alpha = 0.057$) e do número de Prandtl - Schmidt da turbulência, considerado igual a 4/3.

A eq. (5) só é válida para a zona escoamento estabelecido, de resto aquela que mais interessa, pois a zona de estabelecimento é muito curta, com uma extensão da ordem de 6 vezes o diâmetro. Assinale-se que a eq. (5) também é aplicável aos chamados jactos de fenda, ou planos, circunstância que pode interessar quando os jactos interferem, sendo o sistema de descargas pontuais assimilado a uma descarga linear através de uma fenda. No entanto, as expressões correspondentes a A e $(G/G_0)_j$ são diferentes para essa situação - **Neves (1985)**.

3.2 Para exemplificar, considere-se mesmo caso analisado em 2.5, mas agora com descarga vertical através de difusor de $\varnothing 500$ mm (*) assente no fundo, provido de 20 orifícios com diâmetro de 80mm, espaçados de 1.5 m . pretende-se estimar o aumento de temperatura à superfície e o campo de temperaturas nos jactos descarregados.

Resolução:

Os jactos verticais desenvolvem-se sob a forma de um cone com um ângulo de abertura da ordem dos 24°, pelo que neste exemplo não haveria a interferência entre jactos vizinhos.

$$Q_{orif} = 0.300/20 = 0.015 \text{ m}^3/\text{s} ; u_0 = 4 \times 0.015 / \pi \times 0.08^2 = 2.98 \text{ m/s}$$

$$g'_0(\text{ex 2.5}) = 0.035 \text{ m/s}^2 ; F_0 = 2.98 / (0.035 \times 0.08)^{1/2} = 56.3$$

Para calcular a elevação da temperatura à superfície utilizam-se as eq. (5,6,7,8) para $Z = 3.5\text{m}$:

$$\Delta T_m / \Delta T_0 = 5.42 (3.5 / 0.08)^{-1} [1 + 0.282 [3.5 / (56.3 \times 0.08)]^2]^{-1/3} = 0.118$$

Portanto, à superfície $\Delta T_m = 0.118 (32-17) = 1.8^\circ \text{C}$

A distribuição do excesso de temperatura em secções transversais é considerada gaussiana, representada pela equação :

$$\Delta T / \Delta T_m = \exp [-5.8 (r/Z)^2] \quad (9)$$

válida para jactos circulares, onde ΔT representa o seu valor à distância r do eixo (a constante está relacionada com o coeficiente de arrastamento e com o número de Prandtl-Schmidt da turbulência). Conjugando a equação (9) com a lei de variação axial atrás considerada, é possível calcular a temperatura em qualquer ponto e, se interessar, representar as isotérmicas. (fig. 4)

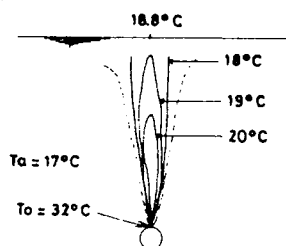


Fig.4- Temperaturas no jacto - isotérmicas do exemplo 3.2.

* Habitualmente, para melhorar o funcionamento hidráulico do difusor, o diâmetro é reduzido para jusante; trata-se, no entanto, de questão marginal ao exemplo tratado.

3.3. Na prática pode haver uma conjugação de factores que conduza a situações muito mais complexas do que as que foram examinadas. Resultam, por exemplo, de:

- a) descargas não verticais (em geral prefere-se a solução horizontal para aumentar o trajecto dos jactos e, conseqüentemente a diluição);
- b) pequeno espaçamento entre orifícios, provocando interferências;
- c) correntes ambientais causadoras de deflexão e diferentes processos de mistura;
- d) estratificação térmica do meio receptor;
- e) reduzida profundidade do mesmo, eventualmente geradora de situações instáveis, caracterizadas por efeitos de recirculação que modificam a estrutura típica dos jactos.

Uma boa discussão sobre o assunto pode ser encontrada, por exemplo, em **Jirka, Abraham e Harleman (1975)** e **Jirka (1982)**

Recorrendo a algumas hipóteses simplificadas (entre as quais a adopção de um coeficiente de arrastamento constante e discutível caracterização da distribuição transversal de temperaturas nos jactos planos) a Environmental Protection Agency - E.P.A (1972) preparou um manual que constitui bom auxiliar para estudos de primeira aproximação. O exemplo que se segue é tratado por essa via.

3.4. Seja o caso de um difusor com orifícios de 0.30 m de diâmetro, espaçados de 0.45 m, descarregando água à temperatura de 24° C num lago com a estratificação térmica exibida na fig. 5. A descarga é horizontal, com $F_0 = 25$

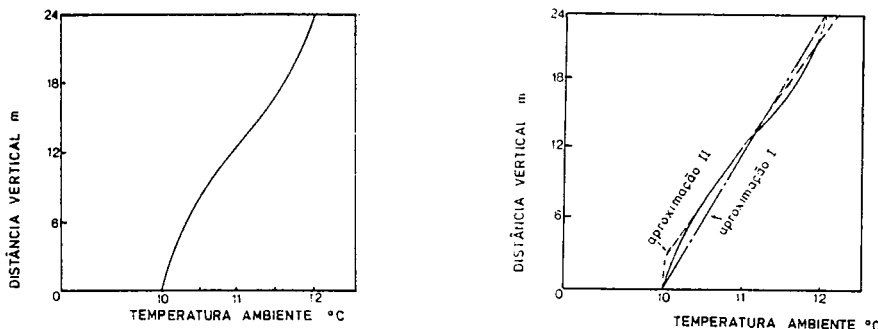


Fig.5 - Perfil de temperaturas e aproximações consideradas.

Pretende-se determinar a trajectória dos jactos, o nível máximo atingido e o local onde a temperatura no eixo iguala a temperatura ambiente.

Resolução:

Uma vez que o perfil de temperaturas no lago é irregular, consideram-se duas aproximações (I e II).

a) Na aproximação I o perfil é considerado linear desde o ponto de descarga até à superfície. Há que calcular o parâmetro de estratificação, definido por

$$S_1 = (\Delta T_0 / D) / (dT_a / dz) \quad (10)$$

Neste caso obtém-se $S_1 = (14 / 0.30) / (2/24) = 560$. A relação entre o espaçamento dos orifícios e o seu diâmetro é $L/D = 1.5$. Tomando $Z_s / D = 0$ (vd. fig.5), θ (ângulo com a horizontal) = 0 e $F_0 = 25$, a trajectória será aproximadamente representada pela curva I da fig. 6a.

O nível máximo corresponde a $Z / D \cong 75$, ou seja, $Z_{m\acute{a}x} \cong 22$ m. Coordenadas do ponto onde $T_m = T_a$: $X / D \cong 100$, $Z / D \cong 43$ (i.e. $X \cong 30$ m, $Z \cong 13$ m).

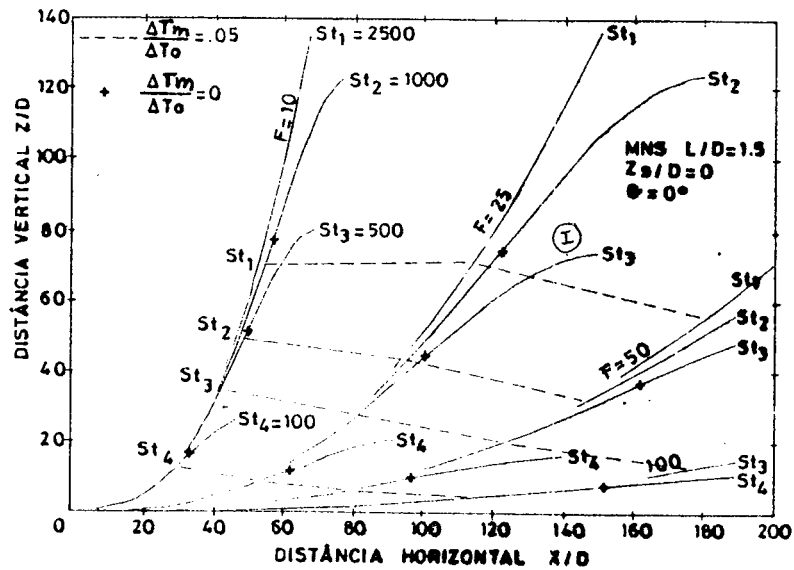


Fig. 6a- Exemplos do manual da EPA(1972): trajetória e temp. em ambiente estratificado

b) Na aproximação II o perfil de temperaturas é considerado linear a partir de $Z_s = 3$ m. seguindo os passos anteriores.

$$St_1 = (14 / 0.30) / (2.4 / 21) = 408, \quad L/D = 1.5, \quad Z_s/D = 10, \quad \theta = 0, \quad F_0 = 25.$$

O ábaco a utilizar para este caso seria o que corresponde à fig.6 b. A trajetória andaria ligeiramente abaixo da curva II. Por interpolação,

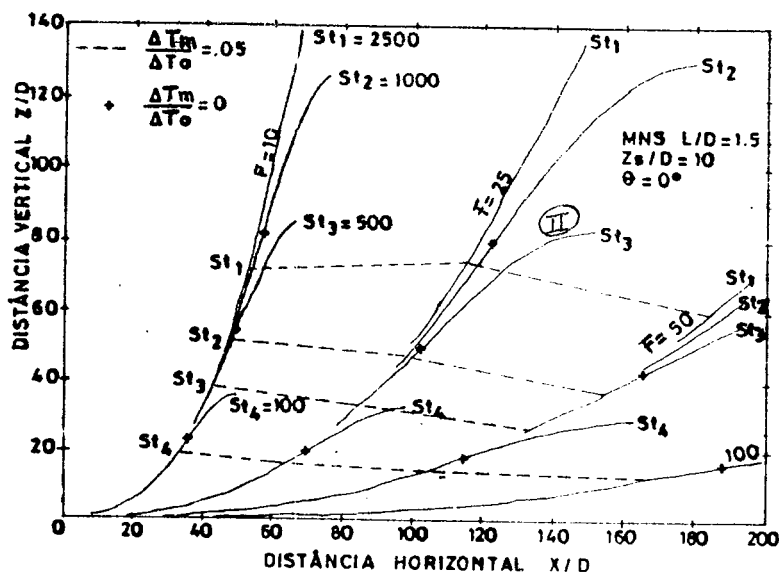


Fig. 6b- Exemplos do manual da EPA (1972): trajetória e temp. em ambiente estratificado

$Z_{m\acute{a}x} \approx 21$ m e as coordenadas do ponto onde $T_m = T_a$ seriam $X \approx 28$ m, $Z \approx 11$ m. Como se vê, as soluções pouco diferem de uma aproximação para a outra.

AGRADECIMENTO

Os autores agradecem à Linha de Acção "Engenharia Sanitária" do Centro de Engenharia Civil da Universidade do Porto/Instituto Nacional de Investigação Científica (INIC) e ao Instituto Politécnico de Viana do Castelo as facilidades concedidas para a preparação deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- Brocard, D.N. (1984) - "Surface Buoyant Jets in Stagnant water", ASCE, J. Hyd. Div., vol. 110, HY6
- Environmental Protection Agency (1972) - "Workbook of Thermal Plume Prediction, vol. I Submerged Discharge", Oregon, U.S.A.
- Jirka, G., et al (1975) - "An Assessment of Techniques for Hydrothermal Prediction", Mass. Inst. Tech., Report nº 203.
- Direction des Études et Recherches d'Électricité de France (1980) - "Energie Électrique et Environnement", Ed. Eyrolles, Paris.
- Jirka, G., et al (1981) - "buoyant Surface Jets", ASCE, J. Hyd. Div., vol. 107, HY11.
- Jirka, G. (1982) - "Multiport Diffusers for Heat Disposal: a Summary", ASCE, J. Hyd. Div., vol. 108, HY12.
- Morton, B., et al (1956) - "Turbulent Gravitational Convection from Maintained and Instantaneous Sources", Proc. Royal Soc., A234.
- Neves, M. J. (1985) - "Estudo de Jactos Turbulentos", Dissertação para doutoramento na Fac. Eng^a. Universidade do Porto.
- Neves, M. J. (1987) - "Apontamentos da disciplina Fenómenos de Transporte e Mistura", Curso de Mestrado em Hidráulica e Recursos Hídricos (1987/89), Fac. Eng. Uni. Porto.