

## AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA DISPERSÃO DA PLUMA DE UM JATO DENSO

*Mauricio Romero<sup>1</sup> & Lediane Marcon<sup>2\*</sup> & Rafael Bueno<sup>3</sup> & Liege F.K. Wosiacki<sup>4</sup>  
& Michael Mannich<sup>5</sup> & Tobias Bleninger<sup>6</sup>*

**Resumo** - No presente trabalho, efetuou-se uma avaliação teórico-experimental de variáveis específicas presentes na dispersão da pluma de um jato em condições submersas num tanque sem corrente ou estratificação, empregaram-se as equações de Bernoulli e de continuidade nos experimentos, com a finalidade de avaliar as velocidades de saída do jato e a vazão. Através da estimativa de Erros Percentuais Absolutos, *EPA*, avaliaram-se os resultados obtidos. Observa-se que os resultados para as variáveis que descrevem as diferentes alturas das plumas dos jatos são *EPA* da ordem de 30 % em média, enquanto os resultados obtidos para os comprimentos horizontais *EPA* apresenta elevações de 60 % em média em suas estimativas. Considera-se que as possíveis causas destes resultados podem se atribuir a imprecisões na caracterização geométrica do conduto impulsor, bem como em suas propriedades hidráulicas e nas estimativas das variáveis de interesse dos jatos por médio da análise de imagens ou fotografias durante a fase experimental. Todos estes fatores incrementam a incerteza na obtenção de resultados mais confiáveis. Para uma melhor avaliação a respeito da precisão das considerações teóricas sobre uma base experimental, requer-se a mais ensaios experimentais, onde se disponha de um sistema de medida confiável e preciso de velocidades e vazões.

**Palavras-Chave** – Jatos, Plumam, Perdas

## EXPERIMENTAL ASSESSMENT OF THE DISPERSION OF A SUBMERGED DENSE JET

**Abstract** – In the present research work, a theoretical and experimental assessment of the specific variables playing a key-role on the dispersion of a submerged jet in a tank have been made. Bernoulli and continuity equations were applied with the aim of evaluating the outlet velocities and discharges. Results were assessed by using the Absolute Percentage Error index. It is observed that the results are accurate when considering variables that estimate different plume elevations; with values of *EPA* of about 30 % in average, while for the horizontal lengths, *EPA* presents values close to 60 % in average. It is considered that possible causes of the obtained results may be attributed to an inaccurate geometric characterization of the tube nozzle and its hydraulic properties, as well as less reliable qualitative measurements of the relevant plume variables using photographs during the experimental phase. All the mentioned factors increase the uncertainty of the results. For a better assessment of the accuracy of the theoretical considerations based upon an experimental basis, more laboratory experiments are needed, where a precise velocity or discharge measuring equipment is available.

**Keywords** – Jets, Plumam, Losses

<sup>1</sup> Afiliação: Doutorando PPGERHA, Universidade Federal do Paraná, e-mail: mauri.romero.merida@gmail.com

<sup>2</sup> Afiliação: Mestranda PPGERHA, Universidade Federal do Paraná, e-mail: lediane.engambiental@gmail.com

<sup>3</sup> Afiliação: Mestrando PPGEA, Universidade Federal do Paraná, e-mail: rafael.bueno.itt@gmail.com.

<sup>4</sup> Afiliação: Doutoranda PPGERHA, Universidade Federal do Paraná, e-mail: liegewosiacki@gmail.com

<sup>5</sup> Afiliação: Professor do Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Paraná (UFPR), e-mail: mannich@ufpr.br.

<sup>6</sup> Afiliação: Professor do Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Paraná (UFPR), e-mail: bleninger@ufpr.br.



- Fluxo de quantidade de movimento  $M_o = U_o Q_o$ ; em  $m^4/s^2$ , onde  $U_o$  é a velocidade de saída do jato; em m/s, e  $Q_o$  é a vazão de saída, em  $m^3/s$ .
- Fluxo de empuxo  $J_o = Q_o g' o$ ; em  $m^4/s^3$ .
- Escala de comprimento de  $L_M = M_o^{3/4}/J_o^{1/2}$ ; em m, que é a distância na qual o fluxo de quantidade de movimento domina o jato.
- Escala de comprimento da vazão  $L_Q = Q_o/M_o^{1/2}$ ; em m, que é a distância na qual as características geométricas do difusor dominam o jato (Doneker e Jirka, 1990).
- Número de Reynolds  $Re = (U_o D_o)/\nu$ ; adimensional, que é o número entre forças de inércia e forças viscosas, indicando se o fluxo é laminar, de transição ou turbulento, onde  $D_o$  é o diâmetro de saída do jato; em m, e  $\nu$  é a viscosidade cinemática do água de  $1.24 \times 10^{-6} m^2/s$ .
- Número de Froude densimétrico  $F_o = U_o/(g' o D_o)^{0.5}$ ; adimensional, que é o quociente entre forças de inércia e forças gravitacionais em um ambiente de gravidade reduzida  $g' o$ .

Conseqüentemente, os valores normalizados de  $Z_{max}/L_M$ ,  $z_{max}/L_M$ ,  $X_{max}/L_M$  e  $X_i/L_M$  podem ser estimados por meio dos gráficos de Jirka (2008), apresentados na Figura 2.

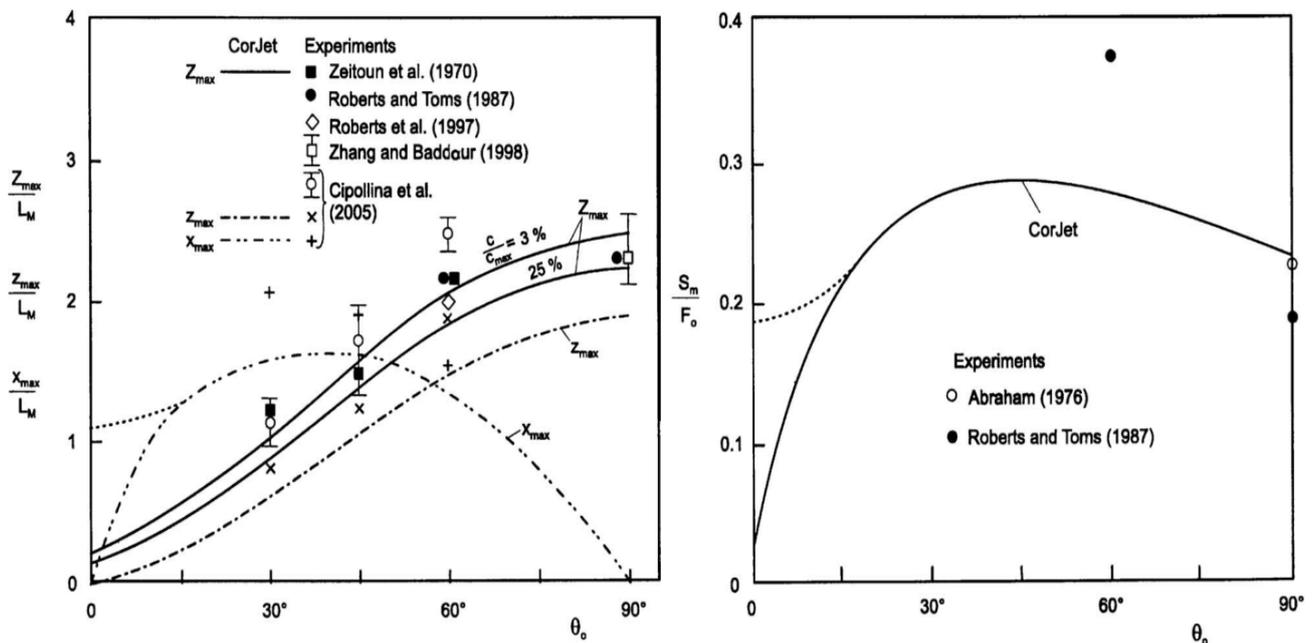


Figura 2 -  $Z_{max}/L_M$ ,  $z_{max}/L_M$ ,  $X_{max}/L_M$  e  $X_i/L_M$  vs. ângulo de inclinação de saída do jato  $\theta_o$  (Jirka, 2008)

O objetivo desse trabalho é analisar dois jatos em experimentos laboratoriais sob diferentes condições iniciais de operação e preparo afim de entender melhor quais os mecanismos do problema, tendo como base as prerrogativas teóricas.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para que fosse possível determinar as diferentes massas específicas  $\rho$  adotadas em cada um dos experimentos foram efetuados os cálculos referentes à quantidade de sal desejada para diferentes salinidades, a fim de se obter uma curva de regressão com base nas condutividades relacionadas.

Foram adotados um total de 11 pontos amostrais, sendo uma amostra de água pura, ou seja, sem adição de sal.

Para a execução dos experimentos relacionados ao jato, utilizou-se um tanque principal (Tanque A) de acrílico cheio com água pura (sem adição de sal), que serviu como corpo receptor, um balde de volume conhecido (Tanque B) que serviu como reservatório de alimentação disposto na parte superior do Tanque A e uma mangueira de plástico adaptada; experimento 2, com um bocal de saída de diâmetro conhecido, disposta com um ângulo de fluxo  $\theta_0$  com relação ao eixo vertical. A Figura 3 apresenta o esquema de montagem do experimento.

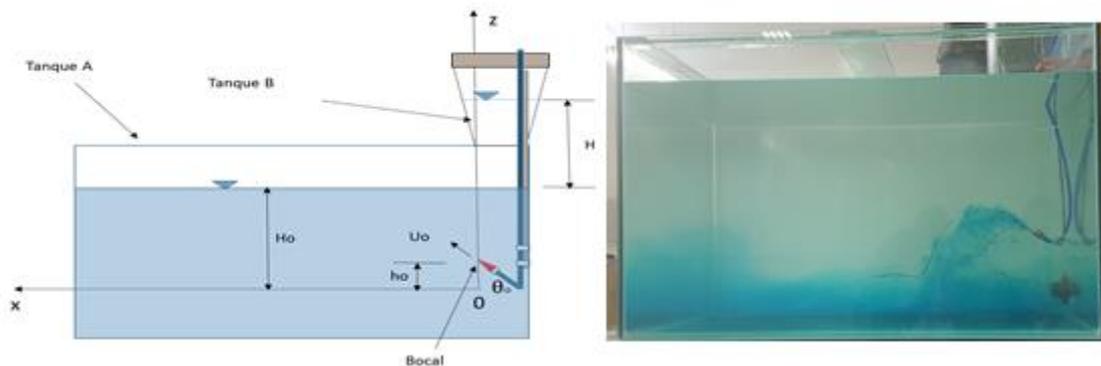


Figura 3 - Esquema de montagem do experimento e vista lateral do tanque

Cada experimento foi efetuado assumindo-se diferentes condições iniciais. O método utilizado para encontrar a velocidade inicial do jato foi através das equações de Bernoulli para uma linha de corrente entre a superfície de água do Tanque B e a saída do bocal e da continuidade. Na análise efetuada tomaram-se em conta as perdas por atrito na mangueira de plástico, à entrada da mesma e no bocal de saída no Tanque A. Portanto, a velocidade de saída do jato  $U_0$  foi estimada por:

$$U_0 = \sqrt{\frac{H + \left(1 + \frac{\rho_w}{\rho_o}\right)(H_0 - h_0)}{\frac{1}{2g} + K_1 + K_2 + K_3}} \quad (1)$$

Onde  $K_1$ ,  $K_2$  e  $K_3$ ; em  $s^2/m$ , são expressões referidas às perdas por atrito, no bocal e à entrada da mangueira de plástico respectivamente (Berlamont, 1986):

$$K_1 = \frac{4^{4/3} n_{man}^2 D_o^4}{D_{man}^{16/3}} L_{man} \quad (2)$$

$$K_2 = \left(\frac{4^{4/3} n_{boc}^2}{D_1^{4/3}} \xi L_{boc} + \frac{K_{L,boc}}{2g}\right) \frac{D_o^4}{D_1^4} \quad (3)$$

$$K_3 = \left(\frac{K_{L,ent}}{2g}\right) \frac{D_o^4}{D_{man}^4} \quad (4)$$

Sendo  $H$ : distância entre os níveis de água entre os tanques A e B; em m,  $H_0$ : distância vertical entre o ponto mais baixo da mangueira e a superfície de água no Tanque A; em m,  $h_0$ : distância vertical entre o ponto mais baixo da mangueira e a saída do bocal; em m,  $\rho_o$ : massa específica do água no Tanque B; em  $Kg/m^3$ ,  $D_{man}$ : diâmetro da mangueira de plástico; em m,  $D_1$ : diâmetro da entrada do bocal; em m,  $L_{man}$ : comprimento da mangueira; em m,  $L_{boc}$ : comprimento do bocal; em m,  $n_{man}$ :

coeficiente de atrito de Manning da mangueira, em  $m^{-1/3}s$ ,  $n_{boc}$ : coeficiente de atrito do bocal, em  $m^{-1/3}s$ ,  $\xi$ : coeficiente de perdas por atrito ao interior do bocal; adimensional,  $K_{L\ emi}$ : perda local da entrada da mangueira no Tanque B; adimensional e  $K_{L\ boc}$ : perda local pela forma do bocal, adimensional. As variáveis mais relevantes são mostradas na Tabela 1.

Tabela 1 - Valores estimados para as variáveis de interesse para os experimentos 1 e 2.

Experimento 1	$D_{man}$ (m)	$D_1$ (m)	$H$ (m)	$h_o$ (m)	$U_o$ (m/s)
	0,003	0,003	0,388	0,031	0,039
	$L_{boc}$ (m)	$D_o$ (m)	$H_o$ (m)	$n_{man}$ ( $m^{-1/3}s$ )	$Q_o$ ( $m^3/s$ )
	0,003	0,003	0,280	0,009	$2,79 \times 10^{-6}$
Experimento 2	$D_{man}$ (m)	$D_1$ (m)	$H$ (m)	$h_o$ (m)	$U_o$ (m/s)
	0,006	0,007	0,226	0,025	0,803
	$L_{boc}$ (m)	$D_o$ (m)	$H_o$ (m)	$n_{man} = n_{boc}$ ( $m^{-1/3}s$ )	$Q_o$ ( $m^3/s$ )
	0,025	0,004	0,143	0,011	$7,72 \times 10^{-6}$

Para a avaliação das diferenças entre os valores das variáveis de interesse observadas  $x_{oi}$  e calculadas  $x_{ci}$  para  $n$  dados usa-se o chamado Erro Percentual Absoluto  $EPA$ , definido como:

$$EPA = \sum_{i=1}^n \left( \frac{|x_{oi} - x_{ci}|}{x_{oi}} \right) \times 100 \% \quad (5)$$

A Tabela 2 apresenta os valores medidos de  $S$ ,  $\rho_w$  e  $\rho_o$  para os experimentos 1 e 2.

Tabela 2. Valores de  $S$ ,  $\rho_w$  e  $\rho_o$  para os experimentos 1 e 2

Recipiente	Parâmetro	Experimento 1	Experimento 2
Tanque A	$S$ (pcu)	1,159	1,366
	$\rho_w$ ( $Kg/m^3$ )	1005,22	1005,36
Tanque B	$S$ (PCU)	44,93	21,06
	$\rho_o$ ( $Kg/m^3$ )	1034,47	1018,68

As características do jato, mostradas na Figura 4, foram estimadas através de filmagens e de marcações feitas no próprio tanque de acrílico durante a execução do experimento. Optou-se por utilizar as marcações por permitirem uma melhor avaliação dos parâmetros desejados.

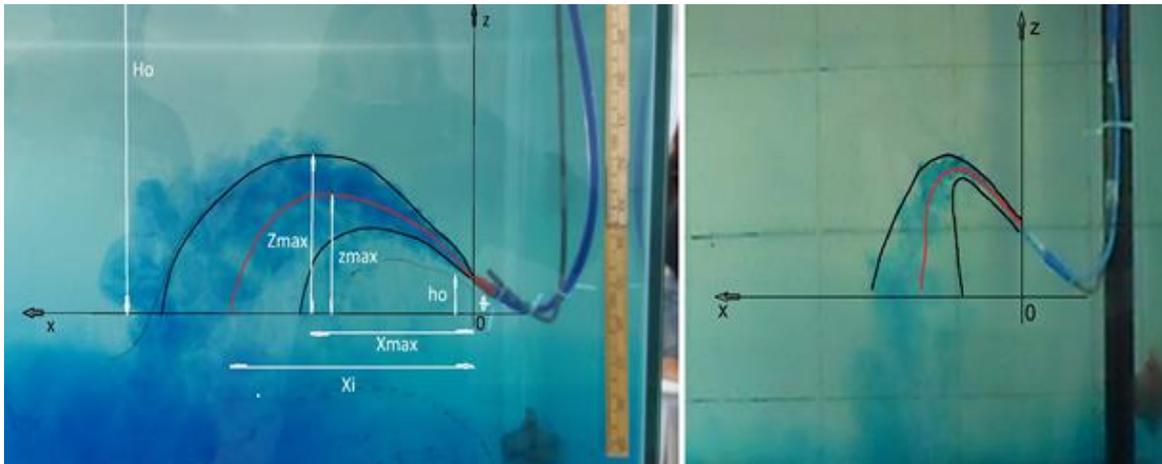


Figura 4 - Esquema das variáveis de interesse no Tanque B para os experimentos 2 e 1 (da esquerda para direita)

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos são mostrados na Tabela 3 para ambos experimentos. Por outro lado, a Tabela 4 apresenta os valores calculados e observados de  $Z_{max}$ ,  $z_{max}$ ,  $X_{max}$  e  $X_i$  e a estimativa dos erros percentuais absolutos *EPA*.

Tabela 3 - Valores estimados para as variáveis de interesse para os experimentos 1 e 2.

Experimento	$\theta_o$ (°)	$\Delta\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	$g'_o$ (m/s <sup>2</sup> )	$M_o$ (m <sup>4</sup> /s <sup>2</sup> )	$J_o$ (m <sup>4</sup> /s <sup>3</sup> )	$L_M$ (m)	$L_Q$ (m)
1	43,000	29,249	0,285	$1,10 \times 10^{-6}$	$7,97 \times 10^{-7}$	0,038	0,003
2	26,560	13,324	0,130	$6,20 \times 10^{-6}$	$1,00 \times 10^{-6}$	0,124	0,003

Tabela 4. Valores calculados e observados de  $Z_{max}$ ,  $z_{max}$ ,  $X_{max}$  e  $X_i$  e *EPA* para os experimentos 1 e 2

Variável	Experimento 1			Experimento 2			Média <i>EPA</i> (%)
	Observado	Calculado	<i>EPA</i> (%)	Observado	Calculado	<i>EPA</i> (%)	
$Z_{max}$ (m)	0,081	0,057	29,59	0,090	0,112	23,99	26,79
$z_{max}$ (m)	0,071	0,038	46,47	0,068	0,084	23,99	35,23
$X_{max}$ (m)	0,100	0,062	38,21	0,110	0,191	73,58	55,90
$X_i$ (cm)	0,144	0,102	29,02	0,165	0,326	97,63	63,32

Da Tabela 4 observa-se que existem erros com valores médios observados e calculados de  $Z_{max}$ ,  $z_{max}$  de 26,79 % e 35,23 % respectivamente, onde os mesmos para  $X_{max}$  e  $X_i$  são de 55,90 % e 63,32 %. Os erros podem ser reduzidos a partir de uma melhor estimativa da velocidade a partir da determinação do diâmetro da mangueira e dos coeficientes de atrito, os quais são muito sensíveis e têm uma influência decisiva nos resultados e de uma estimativa mais adequada das perdas por atrito e locais; por meio dos coeficientes  $K_L$  e  $\zeta$ , os quais somente se conhecem de forma aproximada da literatura científica, e que no presente estudo, se constituem em média no 77 % da carga total  $H$  disponível. Além disto, é importante uma análise mais precisa das fotografias e imagens tomadas dos

experimentos, onde as distorções nas mesmas têm uma grande influência na estimativa adequada das longitudes e alturas de interesse do jato.

Ambos experimentos apresentam regime turbulento, com números de Reynolds ( $Re$ ) de 2265,7 e 956,11 para os experimentos 1 e 2 respectivamente e números de Froude densimétrico ( $F_o$ ) de 37,67 e 13,50.

Em ambos casos,  $L_M > L_Q$  indicando que a geometria do bocal influencia o jato apenas em uma distância pequena nas proximidades do lançamento. A partir da distância  $L_M$  o empuxo passa a ter grande influência no jato.

No experimento 1 a escala  $L_M$ , quantidade de movimento e empuxo são menores que no experimento 2, devido a vazão ser menor naquele experimento. Como a quantidade de movimento é menor, o empuxo começa a dominar o jato a uma distância menor (indicada pela escala  $L_M$ ), qualitativamente pode ser observado na Figura 4 olhando a altura máxima experimental do jato, que no experimento 1 foi menor que no experimento 2.

Por outro lado, observa-se que em função de  $\theta_o$  e  $\Delta\rho$ , a forma e alcance de ambos jatos são as adequadas durante a fase experimental. Finalmente, é necessário mencionar que se precisa contar com um sistema eficiente e preciso de medição experimental de  $Q_o$ , e, portanto, de  $U_o$ , onde ambas variáveis são chaves em todo o cálculo posterior, e, conseqüentemente, ocasiona uma melhora na exatidão e confiabilidade nos resultados

## 4 CONCLUSÕES

No presente trabalho, efetuou-se uma avaliação teórico-experimental de variáveis específicas presentes na dispersão de um jato em condições submersas, através de dois experimentos com ângulos de descarga  $\theta_o$ , diferenças de massa específica  $\Delta\rho$  e características geométricas diferentes do lançamento.

Empregaram-se as equações de Bernoulli e de continuidade em ambos experimentos, com a finalidade de avaliar as velocidades de saída do jato  $U_o$  e a vazão  $Q_o$ , ante a falta de um método de estimativa melhor.

Através da estimativa de Erros Percentuais Absolutos,  $EPA$ , observou-se que os resultados obtidos para  $Z_{max}$  e  $z_{max}$ , possuem valores aceitáveis tendo em conta, além das incertezas discutidas, possíveis efeitos de escala que não foram considerados, enquanto os resultados obtidos para  $X_{max}$  e  $X_i$  apresentaram elevações consideráveis em suas estimativas.

Considera-se que as possíveis causas destes resultados podem se atribuir a imprecisões na caracterização geométrica do conduto impulsor (diâmetros, longitudes da mangueira de plástico e bocal), bem como em suas propriedades hidráulicas (coeficientes de rugosidade de Manning, coeficientes de perdas locais e de atrito) e nas estimativas das variáveis de interesse dos jatos por meio da análise de imagens ou fotografias durante a fase experimental. Todos estes fatores incrementam na incerteza e na obtenção de resultados mais confiáveis.

Para uma melhor avaliação a respeito da precisão das considerações teóricas da literatura na caracterização geométrica de um jato submerso sobre uma base experimental, requer-se ensaios experimentais adicionais onde se disponha de um sistema de medida confiável e preciso de  $U_o$  ou  $Q_o$ .

## REFERÊNCIAS

- BERLAMONT, J. (1986). *Hydraulics of pipe and canal networks*. IUPWARE, KUL – VUB, Belgium. 190 p.
- BLENINGER, T.; JIRKA, G. H. (2008). Modelling and environmentally sound management of brine discharges from desalination plants. In *Desalination*, Elsevier, 221, 1, pp. 585–597.
- BLENINGER, T.; MORELISSSEN, R. (2015). Tiered modeling approach for desalination effluent discharges. In *Intakes and outfalls for seawater reverse-osmosis desalination facilities*. Org. por Missimer, T., Jones, B. e Maliva, R., ed. Environmental Science and Engineering, Springer, Cham, Switzerland, pp. 397 – 449.
- CHEN, H.B. (1991). *Turbulent buoyant jets and plumes in flowing ambient environments*. Aalborg Department of Civil Engineering, Aalborg University. (Series Paper; No. 3). 168 p.
- DONEKER, R. L.; JIRKA, G. H. (1990). CORMIX1: An expert system for mixing zone analysis of conventional and toxic single port aquatic discharges. Athens, GA, USEPA.
- JIRKA, G. H (2008). Improved discharge configurations for brine effluents from desalination plants. *Journal of Hydraulic Engineering*, 34, (1), p. 116–120.
- MORTON, B.; TAYLOR, G. I.; TURNER, J. S. (1956). *Turbulent gravitational convection and instantaneous sources*. Proc. R. Soc. London, 1956.
- RAWN, A. M.; PALMER, H. K. (1930), Pre-determining the extent of a sewage field in sea water. *Proc. ASCE*, 94, 103-60,
- ZEITOUN, M.A.; REID, R.O.; MCHILHENNY, W.F.; MITCHEL, T.M.I, (1970). Model studies of outfall systems for desalination plants. In *Part III Numerical simulations and design considerations*, Res. and Devel. Progress Rep. No. 804, Office of Saline Water, U.S. Dept. of Interior, Washington, DC. 124 p.