

7.º SIMPÓSIO DE HIDRÁULICA E RECURSOS HÍDRICOS
DOS PAÍSES DE LÍNGUA OFICIAL PORTUGUESA
Évora, Maio 2005

**ANÁLISE DO ESCOAMENTO EM RIOS SUJEITOS À INFLUÊNCIA DA MARÉ.
CURVA DE VAZÃO.**

Margarida Isabel Martins dos SANTOS

Eng. Civil, Mestre em Hidráulica e Recursos Hídricos, ESTIG Beja, margarida.martins@estig.ipbeja.pt

João Reis HIPÓLITO

Eng. Civil, Professor Associado Agregado do IST, jh@civil.ist.utl.pt

RESUMO

O escoamento nas secções mais a jusante dos rios, junto à foz ou imediatamente a montante de estuários onde desagüem, integra o conjunto de processos a que a água é sujeita desde a ocorrência das precipitações que o originam e sofre a influência das marés. No entanto, a bibliografia existente raramente aborda este tipo de escoamento e em especial a análise da vazão do rio nessas secções.

No âmbito da dissertação de mestrado do primeiro autor, estudaram-se modelos de regime variável unidimensionais sujeitos na fronteira de jusante aos efeitos da maré. Especificamente, utilizaram-se os modelos numéricos de MacCormack (explícito) e de Preissmann (implícito) para representar as equações completas de Saint-Venant num trecho de cerca de 24 km no rio Sado, imediatamente a montante da cidade de Alcácer do Sal. Com base nos resultados numéricos obtidos analisaram-se quatro modelos de curva de vazão, fisicamente baseados e apoiados nas alturas do escoamento nas duas secções mais a jusante do trecho modelado.

Os autores divulgam neste artigo os principais resultados obtidos no que diz respeito às características do escoamento fluvial influenciado pela maré (altura, caudal, velocidade e número de Froude) e os bons resultados que se conseguem com alguns dos modelos de curva de vazão, com os quais se explica mais de 90% da variância do caudal.

Palavras-chave: Escoamentos variáveis em rios; Cheias; Marés; Modelos computacionais 1-D; Curva de vazão.

1 INTRODUÇÃO

O estudo dos efeitos da maré no escoamento em rios sujeitos à sua influência pode revelar-se de grande importância sob vários aspectos, dos quais se podem citar situações de cheia em rios e erosões localizadas junto a estruturas fluviais, ambas agraváveis pela ocorrência simultânea de marés vivas. No entanto, a bibliografia existente raramente aborda este tipo de escoamento e em especial a análise da vazão em secções do rio na zona das águas de transição.

Assim, no âmbito da dissertação de mestrado do primeiro autor (Santos, 2004), desenvolveram-se modelos computacionais de simulação de escoamentos variáveis unidimensionais em cursos de água naturais, para estudo dos efeitos da maré no escoamento em rios sujeitos à sua influência.

O problema foi formulado com base nas equações completas e unidimensionais de Saint-Venant e para a sua resolução realizaram-se três programas de computador: um para cálculo das características geométricas e hidráulicas fundamentais das secções transversais do rio e os restantes dois, interligados com o primeiro, para o cálculo do escoamento propriamente dito através dos métodos de diferenças finitas explícito de MacCormack (modelo Esquema_Explícito) e implícito de Preissmann (modelo Esquema_Implícito).

Para concretização prática deste trabalho foi escolhido um trecho de cerca de 24 km do rio Sado, imediatamente a montante da cidade de Alcácer do Sal, no qual se verifica a influência da maré no escoamento fluvial e que, quando em cheia, tem provocado importantes danos naquela cidade.

Assim, para o trecho do rio considerado realizaram-se simulações computacionais dos modelos Esquema_Explícito e Esquema_Implícito relativamente a uma situação de cheia e a três situações com caudais a montante constantes, nomeadamente de 2000 m³/s, de 3000 m³/s e de 4000 m³/s, com o objectivo de estudar o escoamento fluvial influenciado pela maré no que diz respeito às suas características em termos de caudal, altura e velocidade do escoamento e número de Froude.

Para cada uma das quatro situações de escoamento referidas foi também realizada a análise de quatro modelos de curva de vazão, fisicamente baseados e apoiados nas alturas do escoamento nas duas secções mais a jusante do trecho do rio Sado em estudo. Nestes modelos são utilizadas formulações matemáticas relativas às teorias das ondas cinemática, difusiva e dinâmica.

2 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DO PROBLEMA EM ESTUDO E SUA MODELAÇÃO COMPUTACIONAL

No estudo dos escoamentos variáveis com superfície livre que ocorrem em cursos de água naturais utilizam-se as equações completas de Saint-Venant, que constituem a formulação matemática dos princípios fundamentais da Hidráulica.

Estas equações representam modelos simples de fenómenos extremamente complexos, incorporando apenas os factores cuja influência no escoamento é mais importante e desprezando aqueles que de acordo com os objectivos da modelação se consideram de importância secundária.

É de assinalar o facto de que as secções transversais do rio, através das quais se processa o referido escoamento variável, na aplicação feita a um trecho do Sado, apresentam uma forma geométrica arbitrária e variam ao longo do comprimento daquele.

Os escoamentos variáveis unidimensionais em rios, considerando que a massa volúmica da água escoada é constante, podem ser descritos por duas variáveis dependentes, por exemplo, a altura do escoamento, h , e o caudal, Q , ou a altura do escoamento, h , e a velocidade média, V , em qualquer

secção transversal do rio considerado. Estas variáveis dependentes definem então o estado do movimento da água ao longo do traçado do rio e no tempo, ou seja, são função de duas variáveis independentes: o espaço, x e o tempo, t .

Assim o problema foi formulado com base nas equações completas e unidimensionais de Saint-Venant, designadamente, equação da conservação da massa e equação da dinâmica, da seguinte forma (ver por exemplo Santos, 2004):

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}(\mathbf{U})}{\partial x} = \mathbf{S}(\mathbf{U}) \quad (1)$$

em que:

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} A \\ VA \end{bmatrix}; \quad \mathbf{F}(\mathbf{U}) = \begin{bmatrix} VA \\ V^2 A + g A \bar{h} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{S}(\mathbf{U}) = \begin{bmatrix} 0 \\ g A(S_0 - J) + g I_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

com:

$A = A(x, t)$ - área da secção transversal do escoamento,

$Q = AV$ - caudal escoado na secção transversal, sendo $V = V(x, t)$ a velocidade média do escoamento nessa secção transversal,

t - tempo (variável independente),

x - distância medida na direcção do escoamento (variável independente),

g - aceleração da gravidade,

I_1 - termo representando o efeito das pressões nas secções líquidas, segundo a direcção longitudinal do escoamento, expressa por:

$$I_1 = \int_0^{h(x)} [h(x) - \eta] \sigma(x, \eta) d\eta \quad (3)$$

sendo h a altura do escoamento na secção transversal do rio considerada e $\sigma(x, \eta)$ a largura da secção transversal à altura η .

I_2 - termo representando o efeito das pressões nas fronteiras sólidas do volume de controlo, segundo a direcção longitudinal do escoamento, expressa por:

$$I_2 = \int_0^{h(x)} [h - \eta] \left[\frac{\partial \sigma}{\partial x} \right]_{h=h_0} d\eta \quad (4)$$

J - perda de carga unitária, dada segundo a fórmula de Manning-Strickler por:

$$J = \left(\frac{Q}{KAR^{2/3}} \right)^2 = \left(\frac{nQ}{AR^{2/3}} \right)^2 \quad (5)$$

sendo R o raio hidráulico,

S_0 - declive longitudinal do leito do rio.

Para a resolução do problema realizaram-se três programas de computador: um para cálculo das características geométricas e hidráulicas de base das secções transversais do rio (modelo Geohid_Sectransv) e dois para cálculo do escoamento através dos métodos de diferenças finitas explícito de MacCormack (modelo Esquema_Explícito) e implícito de Preissmann (modelo Esquema_Implicito).

Tendo em vista a aplicação numérica dos métodos de diferenças finitas utilizados, considerou-se a grelha computacional com espaçamento espacial Δx e temporal Δt , como mostra a Figura 1.

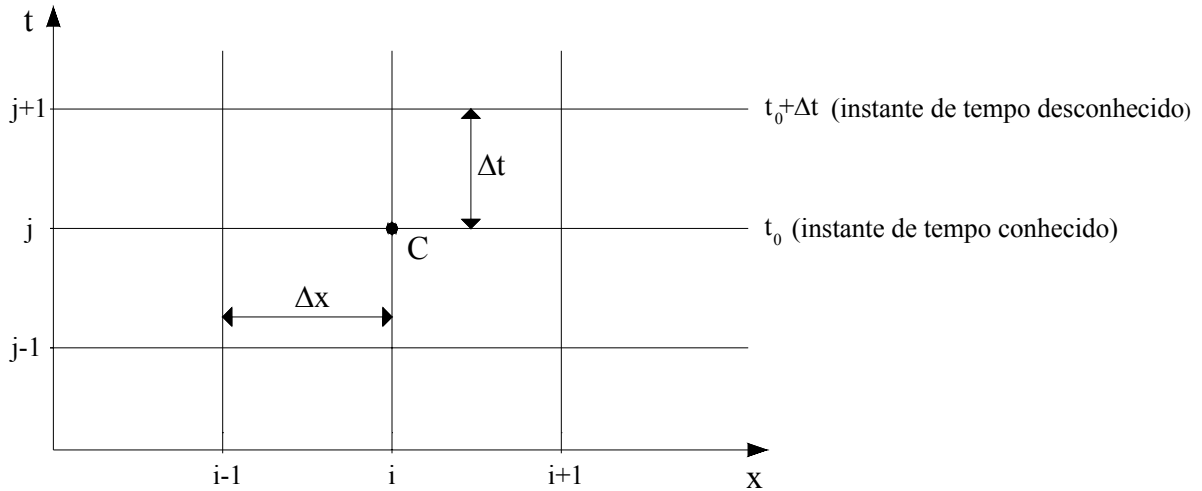


Figura 1 - Grelha computacional para o método de diferenças finitas - adaptada de Roberson, Cassidy e Chaudhry (1997)

O modelo Esquema_Implicito é baseado na discretização numérica do método de Preissmann (ver por exemplo Santos, 2004):

$$\mathbf{U}_i^{j+1} + \mathbf{U}_{i+1}^{j+1} + 2 \frac{\Delta t}{\Delta x} [\theta (\mathbf{F}_{i+1}^{j+1} - \mathbf{F}_i^{j+1}) + (1 - \theta) (\mathbf{F}_{i+1}^j - \mathbf{F}_i^j)] + \Delta t [\theta (\mathbf{S}_i^{j+1} + \mathbf{S}_{i+1}^{j+1}) + (1 - \theta) (\mathbf{S}_{i+1}^j + \mathbf{S}_i^j)] = \mathbf{U}_i^j + \mathbf{U}_{i+1}^j \quad (6)$$

sendo θ um coeficiente de ponderação ($0,5 < \theta \leq 1$).

No presente estudo utilizou-se o valor de 0,7 para o coeficiente de ponderação θ .

Contrariamente ao que sucede com os métodos explícitos, as equações que representam as condições impostas pelas fronteiras são directamente introduzidas no sistema de equações sem ser necessária a combinação com as equações características.

O sistema de equações resultante é composto por equações algébricas, não lineares, as quais podem ser resolvidas através do método de Newton-Raphson.

Os métodos implícitos são, geralmente, incondicionalmente estáveis, ou seja, não existe qualquer restrição no tamanho do espaçamento da malha de cálculo, Δx e Δt , para a estabilidade do método numérico. Contudo, segundo Chaudhry (1993), a precisão obriga que o passo de tempo de cálculo a utilizar esteja próximo do valor máximo que se obtém através da condição de Courant.

O modelo Esquema_Explícito é baseado na discretização numérica do método de MacCormack a qual envolve a realização de dois passos no cálculo: um algoritmo de previsão e um algoritmo de correcção.

Relativamente ao algoritmo de previsão, utilizando diferenças finitas regressivas, têm-se as seguintes relações (ver por exemplo Santos, 2004):

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} = \frac{\mathbf{U}_i^* - \mathbf{U}_i^j}{\Delta t}$$

$$\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial x} = \frac{\mathbf{F}_i^j - \mathbf{F}_{i-1}^j}{\Delta x}$$
(7)

O símbolo * refere-se às variáveis calculadas durante o passo de previsão do método.

Através da substituição destas diferenças finitas nas equações (1) e simplificando obtêm-se as seguintes equações resultantes:

$$\mathbf{U}_i^* = \mathbf{U}_i^j - \frac{\Delta t}{\Delta x} (\mathbf{F}_i^j - \mathbf{F}_{i-1}^j) - \mathbf{S}_i^j \Delta t$$
(8)

Após a realização dos cálculos deste passo para todos os nós computacionais, os valores obtidos são utilizados no passo de correcção seguinte para calcular \mathbf{F}^* e \mathbf{S}^* .

Assim, no algoritmo de correcção, utilizando diferenças finitas progressivas, têm-se as seguintes relações:

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} = \frac{\mathbf{U}_i^{**} - \mathbf{U}_i^j}{\Delta t}$$

$$\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial x} = \frac{\mathbf{F}_{i+1}^* - \mathbf{F}_i^*}{\Delta x}$$
(9)

Substituindo estas diferenças finitas e considerando $\mathbf{S} = \mathbf{S}_i^*$ nas equações (1), obtêm-se as seguintes equações resultantes:

$$\mathbf{U}_i^{**} = \mathbf{U}_i^j - \frac{\Delta t}{\Delta x} (\mathbf{F}_{i+1}^* - \mathbf{F}_i^*) - \mathbf{S}_i^* \Delta t$$
(10)

em que o símbolo ** refere-se aos valores das variáveis obtidos após o passo de correcção do método.

O valor de \mathbf{U}_i no passo de cálculo seguinte, $j+1$, é dado então por:

$$\mathbf{U}_i^{j+1} = \frac{1}{2} (\mathbf{U}_i^* + \mathbf{U}_i^{**})$$
(11)

Relativamente à caracterização das condições de fronteira de um determinado problema, cujo estudo seja realizado através do método de MacCormack, é importante referir que este método não é aplicável nos pontos da malha de cálculo localizados nas fronteiras e, como tal, é necessário recorrer à utilização de outros métodos numéricos de modelação para obter uma equação de definição de cada fronteira externa, que no cálculo global do escoamento seja compatível com as equações já consideradas anteriormente.

Geralmente, quando se aplica o método de MacCormack para resolver as equações de Saint-Venant unidimensionais, para o estudo dos escoamentos gradualmente variáveis em rios, o método que se utiliza na modelação das condições de fronteira é o método das características.

O esquema numérico explícito de MacCormack para ser estável deve satisfazer a clássica condição de Courant-Friedrichs-Lewy, C.F.L., conforme MacCormack (1971) *in* Franco (1996), que se pode expressar da seguinte forma:

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x}{\max(|V| \pm c)} \quad (12)$$

com

$$c = \sqrt{g \frac{A}{B}} \quad (13)$$

Assim, o procedimento explícito tornar-se-á instável se o intervalo de tempo escolhido for demasiado grande. De acordo com o referido critério de Courant o intervalo de tempo dever ser menor do que o necessário para que uma perturbação no escoamento passe de uma secção transversal para outra contígua.

Efectivamente, de um modo geral a estabilidade de todos os métodos numéricos explícitos está sujeita a esta condição.

3 APLICAÇÃO DOS MODELOS COMPUTACIONAIS REALIZADOS A UM CASO DE ESTUDO REAL

Para concretização prática deste trabalho aplicaram-se os modelos computacionais realizados ao trecho do rio Sado cujas secções a montante e a jusante são, respectivamente, a situada a cerca de 1 km a jusante da confluência do rio Xarrama com o rio Sado e a localizada imediatamente a montante de Alcácer do Sal, na qual se verifica a influência da maré no escoamento fluvial, não se tendo considerado as afluições entre estas secções (Figura 2).



Figura 2 - Localização dos treze perfis transversais realizados - adaptada do “Plano da Bacia Hidrográfica do Rio Sado” (2002)

No trecho do rio Sado em estudo foram discretizadas treze secções transversais, aproximadamente espaçadas entre si de uma distância de 2000 m (Figura 2).

Nos modelos de cálculo automático desenvolvidos para simulação computacional da propagação de escoamentos gradualmente variáveis unidimensionais em cursos de água naturais sujeitos à influência da maré, utilizaram-se para condições iniciais as que correspondem ao regime permanente com caudal e altura do escoamento constantes, respectivamente na fronteira de montante e na fronteira de jusante. Assim, a partir de determinadas condições iniciais arbitradas pelo utilizador e através das equações do regime variável consideradas procedeu-se ao cálculo automático das características do escoamento até à sua convergência para o referido regime permanente ao longo da totalidade do trecho do rio em estudo.

Usualmente, tal como é seguido neste trabalho, as condições iniciais consistem nos valores dos caudais e das alturas do escoamento relativamente ao instante inicial de cálculo, ou tempo zero, definidos para as secções que limitam os segmentos em que se considera dividido o trecho do rio em estudo.

No que concerne às condições de fronteira, consideram-se um hidrograma de caudais para a fronteira de montante e um hidrograma de alturas do escoamento para a fronteira de jusante, que representa a influência da maré no escoamento fluvial.

Realizaram-se simulações computacionais, utilizando os modelos Esquema_Explícito e Esquema_Implicito relativamente às seguintes quatro situações de escoamento: um hidrograma de cheia a montante, $Q_{\text{montante}} = 2000 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_{\text{montante}} = 3000 \text{ m}^3/\text{s}$ e $Q_{\text{montante}} = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$.

O hidrograma de caudais considerado na secção de montante do trecho do rio Sado em estudo corresponde a uma situação de cheia estimada de acordo com informação constante do documento "Plano da Bacia Hidrográfica do Rio Sado". Relativamente a este hidrograma de caudais é importante referir que o valor de caudal máximo foi de $2820 \text{ m}^3/\text{s}$.

O hidrograma de alturas do escoamento considerado na secção de jusante do trecho do rio Sado em estudo, junto a Alcácer do Sal, corresponde a um período de sizígia para a cheia considerada, o qual foi estimado com base na análise da informação hidrométrica e topográfica recolhida, quer de forma indirecta, quer directamente por observações *in situ*.

É importante referir que em modelos unidimensionais de escoamentos em rios a água só se escoava para montante em situações de forte influência de jusante, como no caso em estudo, a existência do fenómeno maré a influenciar o escoamento fluvial.

Para ilustrar os resultados obtidos no que diz respeito às características do escoamento fluvial influenciado pela maré em termos das grandezas caudal, altura e velocidade do escoamento e número de Froude, apresentam-se neste artigo, sob a forma de representações gráficas, os referentes ao modelo Esquema_Implicito e à situação de escoamento $Q_{\text{montante}} = 3000 \text{ m}^3/\text{s}$ (Figuras 3 e 4).

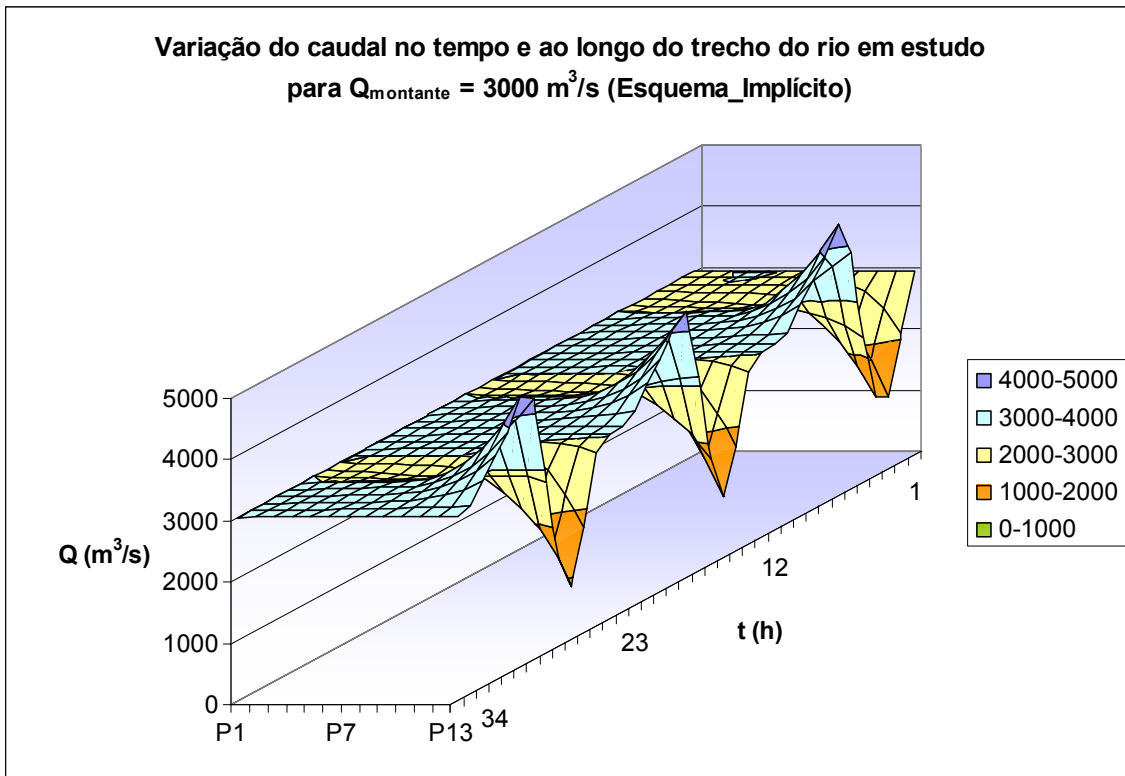


Figura 3 - Representação em perspectiva do caudal e da altura do escoamento no tempo e ao longo do trecho do rio em estudo para $Q_{montante} = 3000 \text{ m}^3/\text{s}$ (Santos, 2004)

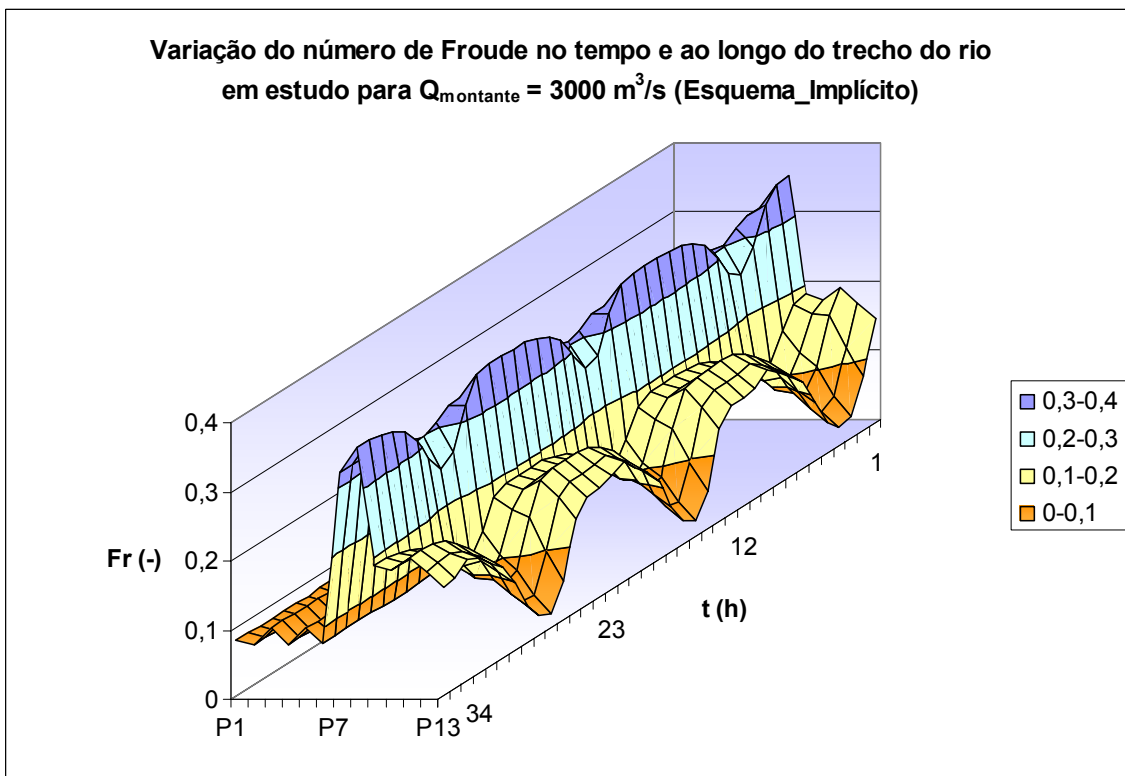
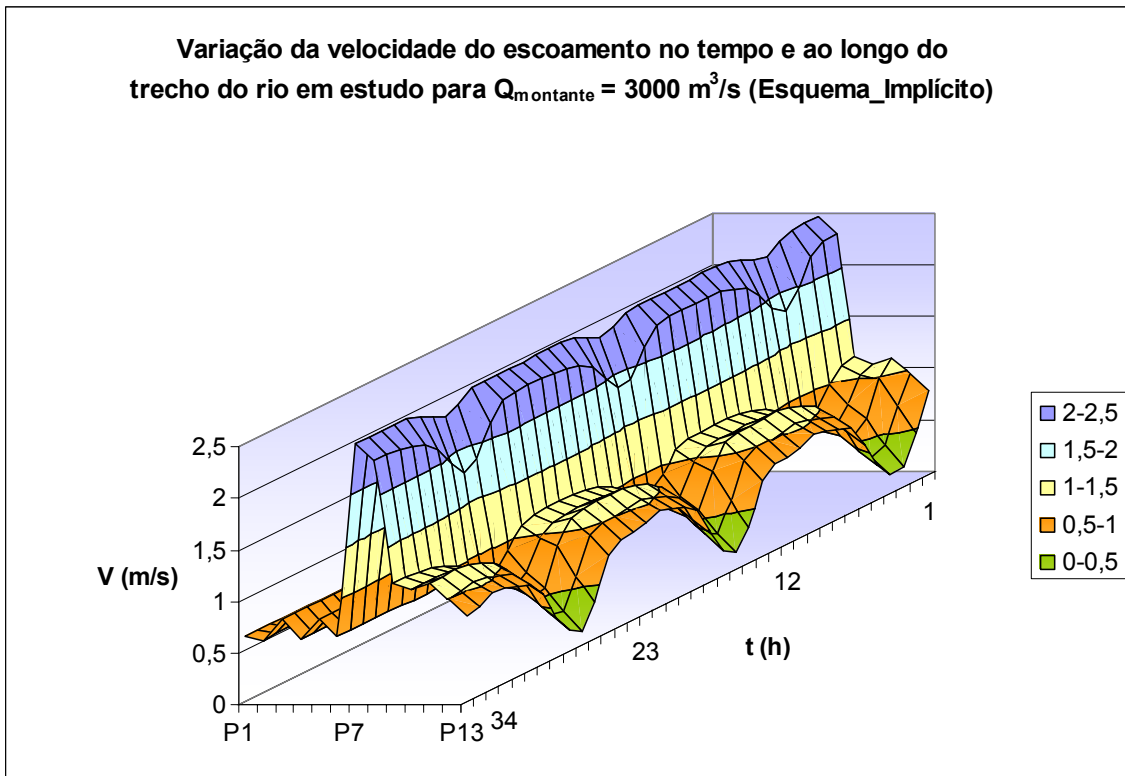


Figura 4 - Representação em perspectiva da velocidade do escoamento e do número de Froude no tempo e ao longo do trecho do rio em estudo para $Q_{montante} = 3000 \text{ m}^3/\text{s}$ (Santos, 2004)

Neste estudo procedeu-se também à análise da curva de vazão na secção mais a jusante do trecho do rio Sado considerado (secção P13) para cada uma das quatro situações de escoamento referidas anteriormente, cheia e caudais a montante constantes de 2000 m³/s, de 3000 m³/s e de 4000 m³/s, tendo sido utilizadas quatro formulações matemáticas correspondentes às teorias de onda cinemática, difusiva e dinâmica, as quais são apresentadas seguidamente.

Considerando:

$$\xi = 1 - \frac{V^2}{c^2} \quad (14)$$

e

$$\eta = \frac{V}{c^2} \quad (15)$$

tem-se que o caudal estimado é expresso, consoante a teoria de onda, da seguinte forma:

$$\hat{Q} = \text{sgn} \left(S_0 - \xi \frac{\partial h}{\partial x} + \eta \frac{\partial h}{\partial t} \right) \times a h^b \sqrt{\left| S_0 - \xi \frac{\partial h}{\partial x} + \eta \frac{\partial h}{\partial t} \right|} \quad (16)$$

para a teoria da onda dinâmica, designada por 2.^a análise,

$$\hat{Q} = \text{sgn} \left(S_0 - \frac{\partial h}{\partial x} + \eta \frac{\partial h}{\partial t} \right) \times a h^b \sqrt{\left| S_0 - \frac{\partial h}{\partial x} + \eta \frac{\partial h}{\partial t} \right|} \quad (17)$$

para a teoria da onda dinâmica, designada por 1.^a análise,

$$\hat{Q} = \text{sgn} \left(S_0 - \frac{\partial h}{\partial x} \right) \times a h^b \sqrt{\left| S_0 - \frac{\partial h}{\partial x} \right|} \quad (18)$$

para a teoria da onda difusiva e

$$\hat{Q} = \text{sgn} (S_0) \times a h^b \sqrt{|S_0|} \quad (19)$$

para a teoria da onda cinemática,

onde a , b , ξ e η são parâmetros que neste estudo foram estimados pelo método do mínimo dos quadrados. Como se reconhecerá, $a h^b$ pode ser assimilado à capacidade de transporte de um canal prismático com uma secção transversal idêntica à da fronteira de jusante (secção P13).

Assim, com base nestas quatro formulações matemáticas realizaram-se quatro modelos de curva de vazão fisicamente baseados e apoiados nas alturas do escoamento nas duas secções mais a jusante do trecho do rio Sado em estudo.

De forma a ilustrar a análise da curva de vazão na secção final do trecho do rio modelado, apresentam-se nas Figuras 5, 6 e 7, os resultados obtidos com os quatro modelos de curva de vazão realizados relativamente à situação de escoamento $Q_{\text{montante}} = 3000 \text{ m}^3/\text{s}$.

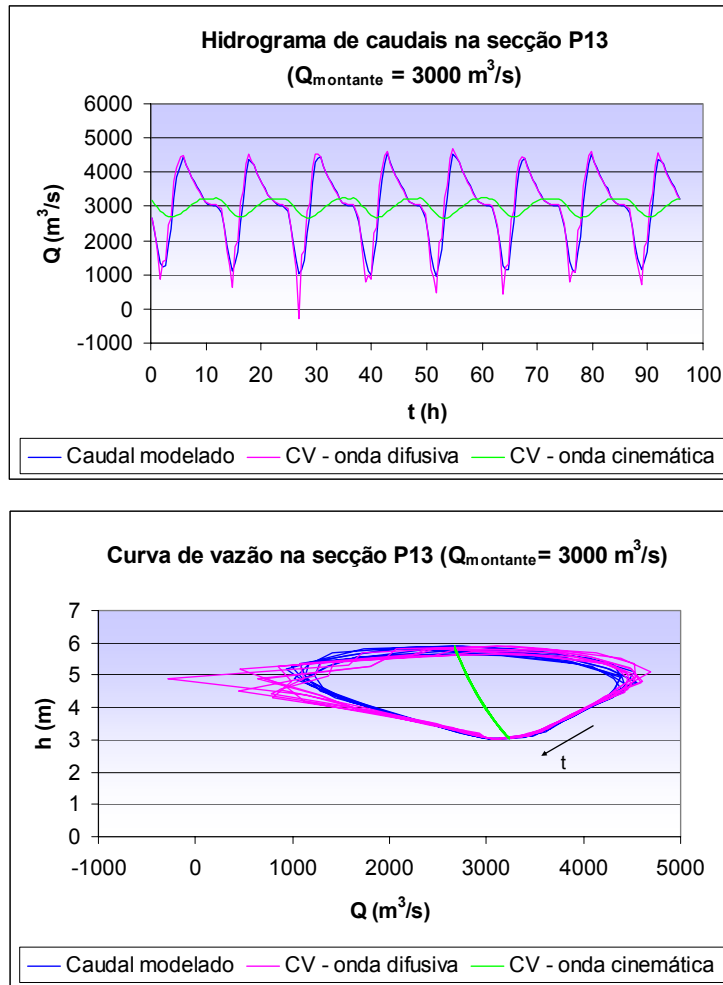


Figura 5 - Hidrograma de caudais e curva de vazão na secção P13 obtida através do modelo computacional e das formulações matemáticas da onda difusiva e da onda cinemática (Santos, 2004)

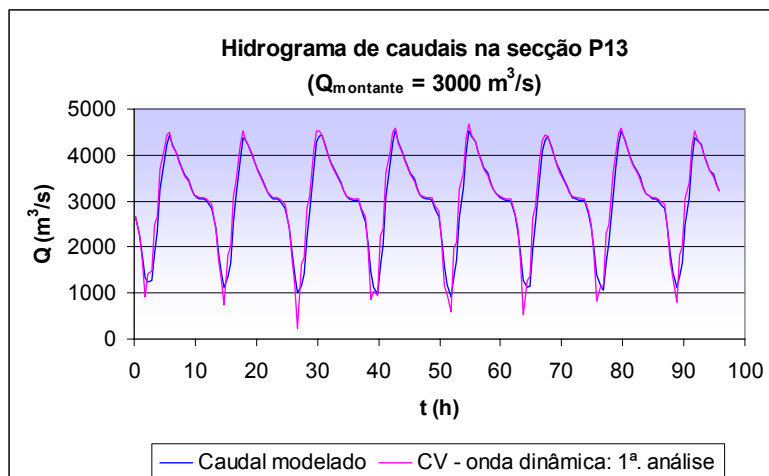


Figura 6 - Hidrograma de caudais e curva de vazão na secção P13 obtida através do modelo computacional e da formulação matemática da onda dinâmica: 1.ª análise (Santos, 2004)

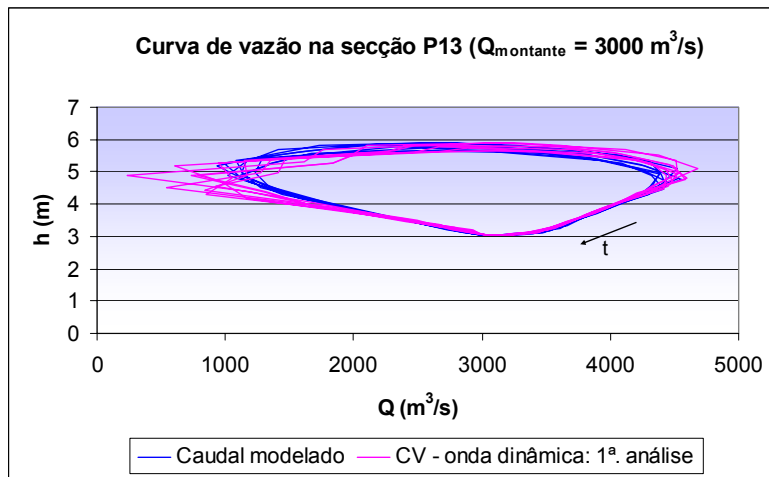


Figura 6 (cont.) - Hidrograma de caudais e curva de vazão na secção P13 obtida através do modelo computacional e da formulação matemática da onda dinâmica: 1.ª análise (Santos, 2004)

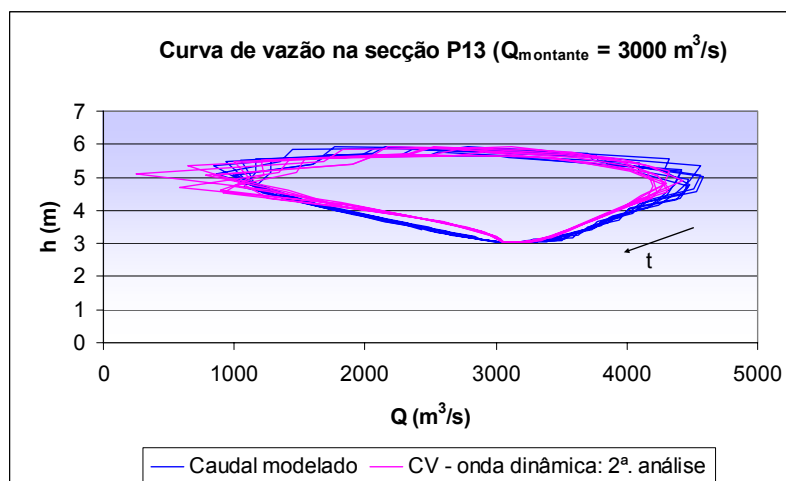
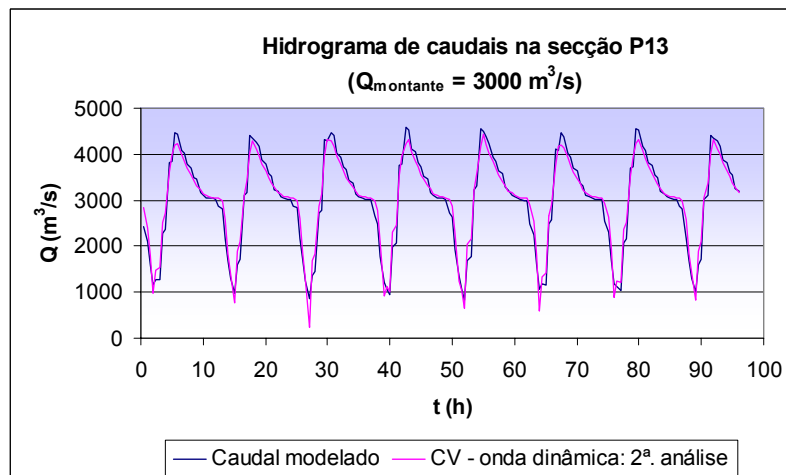


Figura 7 - Hidrograma de caudais e curva de vazão na secção P13 obtida através do modelo computacional e da formulação matemática da onda dinâmica: 2.ª análise (Santos, 2004)

No Quadro 1 apresentam-se os valores estimados para os parâmetros e o respectivo coeficiente de correlação, r , para $Q_{\text{montante}}=3000 \text{ m}^3/\text{s}$.

Quadro 1 - Valores dos parâmetros e do coeficiente de correlação para $Q_{\text{montante}}=3000 \text{ m}^3/\text{s}$

Modelo	a	b	ξ	η	r
Onda cinemática	447513	-0,292	0	0	0,210
Onda difusiva	38797	1,597	1	0	0,977
Onda dinâmica (1.ª análise)	38879	1,596	1	0,0019	0,981
Onda dinâmica (2.ª análise)	39026	1,592	0,9988	0,0015	0,981

4 CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos (Santos, 2004) verificou-se que numa situação de cheia, a simultaneidade da ocorrência da mais alta preia-mar com os caudais de cheia em Alcácer do Sal pode convergir no sentido do aumento significativo dos efeitos negativos provocados pelas cheias no trecho do rio Sado em análise.

Estabeleceu-se uma curva de vazão na secção final do trecho do rio considerado, tendo-se proposto um modelo com o qual se obtiveram resultados de boa qualidade, sendo contudo necessário aferi-los e criticá-los com medições hidrométricas. Com estas medições também se poderá analisar as diferenças Δt e Δx mais adequadas a cada caso específico.

Verificou-se que existe inversão do sentido do escoamento nas situações de cheia e de $Q_{\text{montante}} = 2000 \text{ m}^3/\text{s}$ e que para os caudais superiores considerados tal já não sucedeu.

Constatou-se que a importância da maré no escoamento fluvial, à medida que o caudal a montante aumenta, vai-se confinando às secções de jusante, em trechos sucessivamente mais curtos.

Na secção transversal mais contraída do trecho do rio em estudo, secção P7, verifica-se que as velocidades do escoamento são mais elevadas e que os valores do número de Froude, embora sendo os mais elevados, não ultrapassam 0,5, o que indica que o regime de escoamento é lento no trecho modelado, para os caudais considerados.

Pela mesma razão, contracção na secção P7, verifica-se um aumento considerável da altura do escoamento dessa secção para montante, sendo de destacar a pequena influência da maré a montante daquela secção.

Em virtude das secções transversais do trecho do rio em estudo estreitarem e alargarem de forma não monótona, verificam-se oscilações na velocidade do escoamento e no número de Froude ao longo desse trecho de rio, num determinado instante de tempo.

Relativamente à secção mais a jusante do trecho do rio em estudo (secção P13), é importante referir que, no que respeita ao caudal máximo, este chega a ser cerca de uma vez e meia superior ao caudal constante que entra a montante e tanto maior (em termos relativos) quanto menor for o caudal constante de montante, ocorrendo, para alturas do escoamento que não são máximas, o que pode corresponder a velocidades máximas muito elevadas, que por sua vez poderão conduzir a erosões significativas localizadas junto a estruturas fluviais, cuja segurança poderá assim ser posta em risco.

Do estudo realizado pode também concluir-se que, em rios sujeitos à influência da maré, a relação entre a altura do escoamento e o caudal apresenta forte histerese, verificando-se maior dispersão de caudais para alturas do escoamento mais elevadas.

Na análise da curva de vazão na secção final do trecho do rio em estudo, utilizaram-se as equações das teorias da onda cinemática, difusiva e dinâmica: 1.^a análise e 2.^a análise (mais completa), tendo-se concluído que a teoria da onda cinemática, como seria de esperar, é muito pouco adequada para o estudo de escoamentos em rios com a influência da maré, em particular para o estudo da curva de vazão numa secção transversal de um rio influenciada por esse fenómeno. Contrariamente, as teorias da onda difusiva, da onda dinâmica - 1.^a análise e da onda dinâmica - 2.^a análise são bastante apropriadas para os referidos estudos, sendo de salientar que os resultados obtidos através destas três vias são bastante próximos, não se evidenciando uma diferença muito significativa de uns em relação aos outros. De um modo geral, em termos do coeficiente de correlação entre os caudais modelado e estimado através das equações correspondentes às citadas teorias da onda, a qualidade do ajustamento aumenta na seguinte ordem: onda difusiva, onda dinâmica - 1.^a análise e onda dinâmica - 2.^a análise (Quadro1).

Relativamente aos casos dos caudais a montante constantes, é de referir que as curvas de vazão obtidas através do modelo e estimadas a partir dos estudos baseados nas teorias da onda cinemática, da onda difusiva e da onda dinâmica - 1.^a e 2.^a análises, ajustam-se de forma mais precisa para os caudais mais elevados e que não se verifica tanta precisão nesse ajustamento para os caudais mais baixos.

BIBLIOGRAFIA

CHAUDHRY, M. H. (1993) - "*Open-Channel Flow*". Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.

CUNGE, J. A.; HOLLY, F. M. e VERWEY, A. (1980) - "*Practical Aspects of Computational River Hydraulics*". Pitman Publishing Limited, London.

FRANCO, A. B. (1996) - "*Modelação Computacional e Experimental de Escoamentos Provocados por Roturas de Barragens*". Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa.

MACCORMACK, R. W. (1971) - "Numerical Solution of the Interaction of a Shock Wave with a Laminar Boundary Layer". *Lectures Notes in Physics*. Springer-Verlag, Vol. 8, pp. 151-163.

MINISTÉRIO DO AMBIENTE E DO ORDENAMENTO DO TERRITÓRIO (2002) - "*Plano da Bacia Hidrográfica do Rio Sado*". Decreto Regulamentar N.º 6/2002, publicado no Diário da República N.º 36 de 12-2-2002, Série I - B.

QUINTELA, A. C. (1993) - "*Hidráulica*". 4.^a Edição Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa.

ROBERSON, J. A. ; CASSIDY, J. J. e CHAUDHRY, M. H. (1997) - "*Hydraulic Engineering*", John Wiley & Sons, Inc..

SANTOS, M. I. M. (2004) - "*Estudo dos Efeitos da Maré no Escoamento em Rios Sujeitos à sua Influência. Aplicação ao Rio Sado*." Dissertação submetida para obtenção do grau de Mestre em Hidráulica e Recursos Hídricos, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa.

YEVJEVICH, V. (1975) - "*Unsteady Flow in Open Channels*". Vol. I, Ed. by K. Mahmood and V. Yevjevich, Water Resources Publications, Fort Collins.