

ESCOAMENTOS MISTOS EM COLECTORES

Modelação matemática e algoritmos numéricos

Pedro LOPES

*Eng.º Civil, Mestre em Engenharia Civil, Bolseiro de Investigação IMAR-Coimbra,
DEC-FCT Universidade de Coimbra, Rua Luís Reis Santos, 3030-788 Coimbra, Portugal, pedromiglopes@gmail.com*

José Manuel ABREU

*Eng.º Civil, Doutoramento em Engenharia Civil, Professor Auxiliar,
DEC-FCT Universidade de Coimbra, Rua Luís Reis Santos, 3030-788 Coimbra, Portugal, jabreu@dec.uc.pt*

Jorge LEANDRO

*Eng.º Civil, Doutoramento em Engenharia Civil, Professor Auxiliar,
DEC-FCT Universidade de Coimbra, Rua Luís Reis Santos, 3030-788 Coimbra, Portugal, leandro@dec.uc.pt*

RESUMO

As inundações urbanas são irremediavelmente e infelizmente uma realidade cada vez mais frequente nas nossas cidades. Caracterizam-se por serem fenómenos que conduzem a avultosos danos materiais e desembolso de elevadas quantias de dinheiro nas reparações mas sobretudo é necessário ter em conta os transtornos insupríveis e o sentimento de medo constante que provocam nas populações.

Com o objectivo de potenciar e incrementar o rigor técnico dos actuais métodos de cálculo no decurso da fase de dimensionamento dos colectores, a procura de “softwares” de modelação de colectores pluviais experimentou um crescimento substancial. Vários investigadores desenvolveram e melhoraram modelos capazes de simular, em simultâneo, as redes de colectores e de superfície e a respectiva interacção, ou seja, modelos de Drenagem Dual (modelos DD). No entanto, devido à sua complexidade, a respectiva validação é difícil e os dados reais não existem ou são de fraca qualidade. Além disso, os modelos integrados existentes não modelam adequadamente o escoamento misto nos colectores pluviais, caracterizados pela transição dinâmica de um escoamento com superfície livre para um escoamento em pressão (e vice-versa). Na maioria dos casos, o dimensionamento é realizado assumindo que o escoamento ocorre apenas com superfície livre.

O presente trabalho apresenta uma análise global do problema da ocorrência de escoamentos mistos em colectores, inserindo na mesma as diversas metodologias propostas, e efectua um estudo comparativo (utilizando resultados experimentais recolhidos da bibliografia da especialidade) dos diversos modelos e esquemas numéricos propostos, de forma a verificar qual a formulação que melhor se adapta à simulação de problemas práticos de engenharia.

Palavras-chave: Escoamentos mistos, fenda de Preissmann, modelo TPA, Esquemas Numéricos.

1 – INTRODUÇÃO

As inundações em zonas urbanas são na actualidade uma das prioridades para a UE (e.g. Directiva 2007/60/CE) já que, de acordo com a informação do Painel Intergovernamental para as Alterações Climáticas (IPCC, 2007), assistir-se-á a uma maior frequência de fenómenos extremos como consequência das alterações climáticas. Prevê-se um aumento do risco de inundações nos próximos 100 anos (FORESIGHT, 2004), colocando em perigo o meio ambiente e as estruturas civis. Por isso, a procura de “softwares” de modelação de colectores pluviais experimentou um crescimento substancial.

Por outro lado, o aumento da intensidade das precipitações começa a demonstrar a debilidade dos “SUDS - Sustainable Urban Drainage Systems” (sistemas de drenagem urbana sustentáveis), e dos métodos actuais de dimensionamento das redes de drenagem. Não podendo fazer frente a eventos com períodos de retorno de 20 a 100 anos, mais elevados que a escala típica dos valores de 5 a 20 anos, os colectores inevitavelmente entram em pressão e as não desejadas inundações ocorrem à superfície.

Para fazer frente a esta situação, vários investigadores desenvolveram e melhoraram os modelos (Hidráulicos/ Hidrológicos, Integrados/Acooplados) capazes de simular, em simultâneo, as redes de colectores e de superfície (rede primária de transporte do escoamento) e a respectiva interacção, ou seja, modelos de Drenagem Dual (modelos DD). No entanto, devido à sua complexidade, a validação é difícil e os dados reais não existem ou são de fraca qualidade. Inclusivamente, a validação tem sido efectuada em redes de colectores ou em redes de drenagem superficial, mas não simultaneamente nas duas. Um grupo de investigação do IMAR-Coimbra lidera o projecto “Dual Drainage”, financiado pela FCT (PTDC/ECM/105446/2008), no qual se encontra em execução uma instalação experimental que permitirá realizar testes de laboratório à escala real de forma a produzir dados de boa qualidade que permitam validar os modelos integrados e, em consequência, o conceito Drenagem-Dual.

Os modelos integrados existentes não modelam adequadamente o escoamento misto nos colectores, ou seja, a possibilidade de ocorrência simultânea ou alternada, no mesmo evento hidrodinâmico, de escoamentos com superfície livre e em pressão. A transição dinâmica de um escoamento com superfície livre para um escoamento em pressão (e vice-versa) é um fenómeno algo frequente nos colectores pluviais, por exemplo, quando a chuvada excede a de projecto e a capacidade dos órgãos de entrada é superior à de transporte do colector. Esta entrada em pressão pode também ocorrer como resultado de uma variação brusca das condições de fronteira do sistema de colectores (submersão da secção de saída, entupimentos ou redução de capacidade de transporte em secções intermédias do colector, falha numa estação de bombagem intermédia).

Durante a fase de transição superfície livre/pressão, ocorrem fenómenos altamente instáveis os quais podem originar importantes sobrepressões, colocando em risco a integridade do sistema ou causar outro tipo de problemas como levantamento de grelhas ou tampas de caixas de visita e abatimentos de pavimentos (“basement flooding”). Fenómenos de interacção ar/água podem tornar-se relevantes, particularmente na frente da onda de transição, e em alguns casos o enchimento rápido dos colectores pode provocar o surgimento de “geysers” urbanos (YOUTUBEVIDEO, 2007) originados pela pressurização e expulsão de ar contido nos mesmos.

Em face das considerações anteriores, a possibilidade de ocorrência de um escoamento misto deverá ser necessariamente considerada aquando da modelação hidráulica da rede de colectores. No entanto, na maioria dos casos, o dimensionamento é realizado assumindo que o escoamento ocorre apenas com superfície livre. Tal é explicado pela ausência de um modelo de cálculo

suficientemente robusto e contrastado que permita considerar as transições, embora ao longo dos anos várias propostas tenham sido apresentadas.

1.1 Modelos de cálculo de escoamentos mistos

Uma primeira família de métodos são os denominados modelos de isolamento da frente de onda (“shock-fitting methods”) que resolvem separadamente a(as) zona(s) de escoamento em carga e aquela(s) onde o escoamento ocorre com superfície livre a partir de sistemas de equações e esquemas numéricos distintos. As interfaces de transição são tratados como condições de contorno internas móveis utilizando por exemplo as equações de Rankine-Hugoniot para relacionar a solução em ambos os lados da fronteira (SONG et al., 1983). Estes métodos foram aplicados, por diferentes autores, após a sua introdução por WIGGERT (1972), utilizando o método das características (MOC). No entanto, controlar com precisão a existência e evolução da interface requer algoritmos complexos e específicos. Um outro grupo utiliza uma abordagem através do modelo da coluna rígida pressupondo a existência de processos de compressão e expansão utilizando uma bolha hipotética estacionária. Embora permitam a simulação de configurações de interface de transição complexas, a sua complexidade torna-os inaplicáveis à escala de uma rede.

Uma segunda família, correspondente aos modelos de captura da frente de onda (“shock-capturing methods”), é caracterizada por permitir calcular a solução em todo o domínio com base num único sistema de equações e das qual se salientam dois modelos principais: Modelo da fenda de Preissmann e Modelo TPA (“Two Component Pressure Approach”).

1.1.1 Modelo da fenda de Preissmann

CUNGE e WEGNER (1964) utilizaram pela primeira vez uma fenda hipotética no topo da conduta, idealizada por PREISSMANN (1961), que permite ficticiamente que a lâmina líquida esteja sempre em contacto com a atmosfera (figura 1) de forma a permitir a utilização das equações de Saint-Venant (1871), designadas, abreviadamente, por ESV. Esta ideia foi concretizada utilizando diferentes esquemas numéricos (a escolha do esquema de discretização numérica é completamente independente da aplicação da hipótese de Preissmann – e.g. Método das Diferenças Finitas (MDF), Método das Características (MOC)), sendo-lhes reconhecidas duas limitações principais: não permitem simular escoamentos onde ocorram depressões e a generalidade dos esquemas numéricos exibem instabilidades a partir do momento que a velocidade da onda de pressão na conduta aumenta. A largura da fenda B_{fenda} (m) (parâmetro que permite compatibilizar as equações correspondentes aos escoamentos em pressão com as próprias dos escoamentos com superfície livre) é ajustada para se obter a celeridade a pretendida na zona pressurizada do escoamento utilizando a Eq. (1), na qual A representa a área da secção transversal do escoamento (m^2) e g a aceleração da gravidade (m/s^2). Contudo, o valor de B_{fenda} continua a ser numa primeira tentativa, arbitrado até se conseguirem resultados numericamente estáveis e visualmente fiáveis.

$$a = \sqrt{g \frac{A}{B_{fenda}}} \quad (1)$$

1.1.2 Modelo TPA

Recentemente, VASCONCELOS *et al.* (2006) sugeriu, em alternativa aos modelos que utilizam a fenda de Preissmann, o denominado modelo TPA (Figura 1), que permite desacoplar o termo de pressão das equações Saint-Venant num termo de pressão hidrostática h_c e num termo de pressão diferencial h_s , relacionado com a sobre-pressurização ou sub-pressurização da conduta (assumindo um comportamento elástico fictício das respectivas paredes) utilizando a relação da Eq. (1) em que ΔA representa a variação (fictícia) da área da secção transversal da conduta (m^2), sendo a a celeridade da onda elástica (m/s) anteriormente definida.

$$h_s = \frac{a^2 \Delta A}{g A} \quad (1)$$

Aplicando este conceito, as equações de Saint-Venant tomam o seguinte aspecto:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + g \frac{\partial}{\partial x} A (h_c + h_s) = gA(S_0 - S_f) \quad (3)$$

Este modelo, permitindo a existência de depressões, responde à primeira limitação do modelo de Preissmann mas está por provar que responda à segunda (instabilidades numéricas).




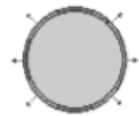
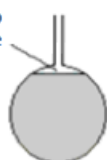

Casos	Modelo da Fenda de Preissmann	Modelo TPA
Escoamento com Superfície Livre		
Escoamento em Pressão	Incremento de área de escoamento 	Incremento radial decorrente da sob-pressurização 
Escoamento Subatmosférico	Regeneração da Superfície Livre 	Decremento radial decorrente da sub-pressurização 

Figura 1 Comparação entre o Modelo da fenda de Preissmann e o Modelo TPA.

1.2 Esquemas de discretização numérica

A resolução das equações de Saint-Venant, que estão na base da formulação dos modelos de Preissmann e TPA, tem sido conseguida através da utilização de diferentes técnicas numéricas, as quais se podem agrupar essencialmente em dois tipos: o método das características (MOC) e o método das diferenças finitas (MDF).

1.2.1 Método das características

O método das características utiliza a estratégia de transformar analiticamente as equações diferenciais parciais (EDPs) em equações diferenciais ordinárias (EDOs) (WYLIE and STREETER, 1993), após o que estas últimas são resolvidas numericamente. No MOC, cada fronteira e cada secção da conduta pode, mediante o estabelecimento de uma estratégia adequada, ser analisada separadamente durante cada passo de tempo, mesmo em sistemas complexos, sendo por isso bastante apropriado para modelar grandes sistemas com condições de fronteira complexas. As desvantagens do MOC prendem-se com a existência de erros numéricos introduzidos pelos esquemas de interpolação utilizados na resolução dos termos convectivos, como ocorre nos casos de escoamentos com superfície livre, e com o facto da estabilidade deste método explícito estar directamente relacionada com o tamanho do passo de tempo utilizado, limitado pela condição Courant–Friedrichs–Lewy (CHAUDHRY, 1987). São vários os “softwares” comerciais a utilizar este método, como é o caso do WHAMO® (2009).

1.2.2 Método das diferenças finitas

O método das diferenças finitas resolve as equações diferenciais parciais por meio de aproximações das derivadas por diferenças divididas (obtidas recorrendo, por exemplo, ao desenvolvimento de uma função em série de Taylor), originando, dependendo do modo como as aproximações são consideradas, dois tipos diferentes de esquemas de diferenças finitas: esquemas explícitos e esquemas implícitos. Os métodos explícitos requerem intervalos de tempo bastante reduzidos, na ordem dos segundos ou milésimos de segundo para que se consiga evitar problemas de instabilidade numérica, superados se for cumprido o critério de estabilidade de Courant. Por outro lado, os métodos implícitos, não são tão instáveis mas a memória computacional despendida por eles é superior ao dos métodos explícitos e a sua programação mais difícil (LEANDRO, 2008).

O esquema de diferenças finitas de Preissmann é um conhecido MDF implícito de 4 pontos utilizado extensivamente para análise de regimes não-permanentes em canais abertos a partir dos anos 60 (LIGGETT and CUNGE, 1975; PREISSMANN, 1961). Segundo CHAUDHRY (1987) este esquema apresenta importantes vantagens para a discretização das equações pois, a variável espacial é calculada recorrendo apenas a dois nós adjacentes; é produzida uma solução exacta para a forma linearizada das equações que modela utilizando uma escolha apropriada dos valores de Δx e Δt ; ambas as variáveis, Q e A são computacionalmente calculadas no mesmo nó e por fim, efectuando a variação do coeficiente de ponderação das derivadas espaciais, podem ser simuladas frentes de onda abruptas. As derivadas parciais em ordem ao tempo e ao espaço e as funções de domínio (x,t) são aproximadas utilizando as seguintes equações:

$$\frac{\partial f(x, t)}{\partial x} \cong \theta \frac{(f_{i+1}^{n+1} - f_i^{n+1})}{\Delta x} + (1 - \theta) \frac{(f_{i+1}^n - f_i^n)}{\Delta x} \quad (5)$$

$$\frac{\partial f(x, t)}{\partial t} \cong \Psi \frac{(f_{i+1}^{n+1} - f_{i+1}^n)}{\Delta t} + (1 - \Psi) \frac{(f_i^{n+1} - f_i^n)}{\Delta t} \quad (6)$$

$$f(x, t) \cong \theta \frac{(f_{i+1}^{n+1} + f_i^{n+1})}{2} + (1 - \theta) \frac{(f_{i+1}^n + f_i^n)}{2} \quad (7)$$

onde $\partial f(x, t)/\partial x$ representa a derivada parcial de f em relação a x , $\partial f(x, t)/\partial t$ representa a derivada parcial de f em relação a t , Δx a distância entre duas secções consecutivas (por exemplo, secções i e $i+1$) e Δt o intervalo de tempo entre os instantes n e $n+1$. Os coeficientes de ponderação

tomam valores entre 0 e 1, sendo usual considerar-se $\Psi=0.5$ e $0.6 < \theta < 1.0$, no sentido de evitar as indesejadas oscilações na solução, tal como concluiu CUNGE (1975).

2 – MODELOS UTILIZADOS

Para o estudo comparativo dos diversos modelos e esquemas numéricos de cálculo foram criadas 4 combinações designadas, respectivamente, por: Mod1, Mod2, Mod3 e Mod4:

- Mod1 - Modelo que utiliza a discretização das ESV em ordem às variáveis (Y, Q) utilizando o esquema de MDF de Preissmann e o modelo da fenda de Preissmann;
- Mod2 - Modelo que utiliza a discretização das ESV em ordem às variáveis (A, Q) utilizando o esquema de MDF de Preissmann e o modelo da fenda de Preissmann;
- Mod3 - Modelo que utiliza a discretização das ESV em ordem às variáveis (A, Q) utilizando o esquema de MDF de Preissmann e o modelo TPA;
- Mod4 – Modelo que utiliza a discretização das ESV em ordem às variáveis (h, V) utilizando o MOC e o modelo da fenda de Preissmann.

3 – APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Neste capítulo vai-se proceder à apresentação e discussão dos resultados numéricos obtidos com os vários modelos, utilizando para o efeito um conjunto de testes com diferente grau de complexidade. Os dois primeiros, resultam de condições de fronteira muito simples que servirão para comparar as potencialidades de cada um dos modelos desenvolvidos neste trabalho e efectuar a escolha daquele que parecer o mais adequado. Posteriormente comparar-se-ão os resultados obtidos através do modelo seleccionado com resultados de testes realizados por outros investigadores, nomeadamente WIGGERT (1972) e VASCONCELOS *et al.* (2006), caracterizados pela transição repentina de um escoamento com superfície livre para um escoamento sob pressão.

3.1 Exemplos de superfície livre pura

Os quatro testes aqui apresentados resultam de equações de fronteira bastante simples em que o escoamento ocorre somente com superfície livre. O colector, suposto horizontal, tem um comprimento de 20m e a respectiva secção transversal vai ser testada para a forma circular de diâmetro 0.2m e para a forma rectangular com as dimensões de 0.5x0.2m. Considerou-se o valor do coeficiente de resistência n , inverso do coeficiente de Manning, igual a 0.012.

Os modelos seleccionados para este teste serão o modelo Mod1, o Mod2 ou Mod3 (que num escoamento com superfície livre não apresentam qualquer diferença pois, a utilização do princípio da fenda de Preissman ou do princípio TPA que os diferencia, apenas terá relevância após a pressurização) e o Mod4.

As condições iniciais correspondem a um regime estacionário de repouso ($Q=0$) com uma altura da lâmina líquida igual a 0.1m (meia secção). Utilizaram-se para condição de fronteira de montante, para cada uma das secções transversais consideradas, duas condições de imposição de altura de lâmina líquida, introduzidas nos modelos sob a forma de hidrogramas (h função de t), como se representa na Figura 2.

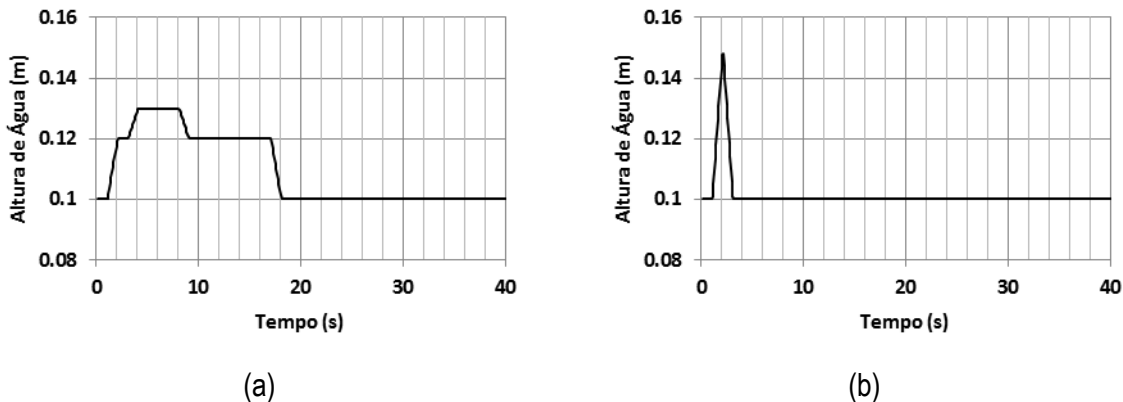


Figura 2 Condições de fronteira de montante: (a) CFM1 , (b) CFM2

Os resultados correspondentes às duas secções (circular e quadrada) e às duas condições de fronteira (CFM1 e CFM2) encontram-se representados na Figura 3. Estes resultados foram obtidos utilizando 100 troços de cálculo ($\Delta x=0.2m$) e $\Delta t=0.2s$ nos Mod1 e Mod2/3. No Mod4 foi somente introduzido o valor de $\Delta x=0.2m$, sendo o valor de Δt ajustado pelo modelo ao longo do tempo de cálculo de forma a cumprir simultaneamente a condição de Courant e minimizar os erros do esquema de interpolação utilizado.

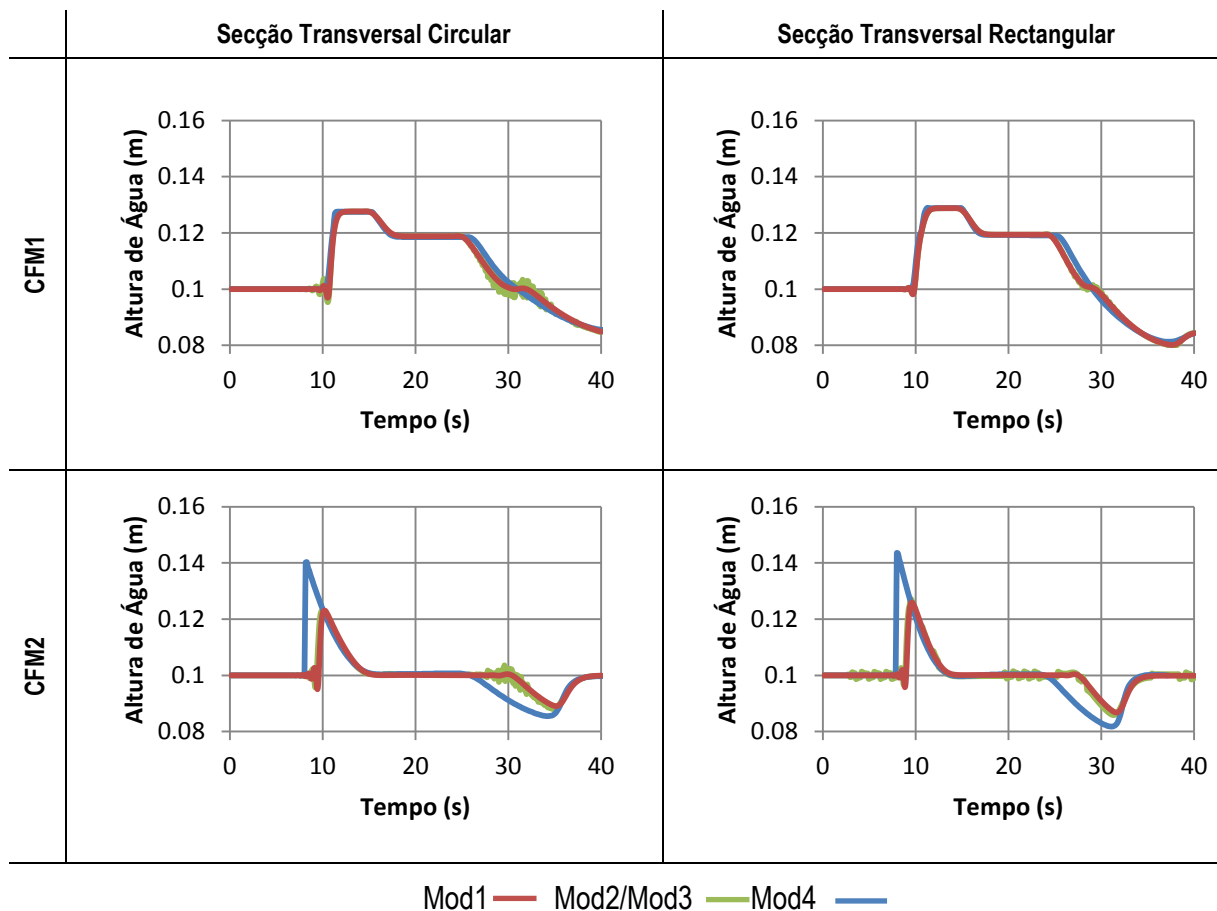


Figura 3 Resultados dos testes de superfície livre pura

Em relação à condição de fronteira de montante 1 (CFM1) os resultados dos quatro testes são muito idênticos entre si em termos absolutos (Figura 3). Interessa ressaltar que os Modelos baseados na discretização em ordem às variáveis (A, Q) (Mod2 ou Mod3), principalmente quando se trata do colector de secção circular, apresentam algumas oscilações numéricas, provenientes, ao que tudo indica, da linearização das equações. Em relação à CFM2, genericamente a situação é idêntica à anterior (Figura 3). No entanto, o aspecto mais interessante prende-se com o facto de o modelo Mod4, baseado no método das características, conseguir simular mais correctamente o “pico” do hidrograma que os restantes modelos, os quais apresentam uma atenuação da respectiva amplitude substancialmente maior. Na opinião dos autores, este erro deve-se sobretudo à linearização dos termos das equações de Saint-Venant efectuada nos modelos que utilizam o esquema de Preissmann de 4 pontos (Mod1,2,3), induzindo algumas suavizações por não permitir a contribuição total de alguns desses termos como por exemplo o termo convectivo das ESV: Q^2/A .

3.2 Exemplos de escoamentos mistos

Os primeiros dois testes, de certa forma idênticos aos do parágrafo anterior, diferindo apenas nas condições de fronteira hidrograma presentes na Figura 4. Desta vez, a altura de água introduzida é superior à altura do colector, fazendo-o entrar repentinamente em pressão, daí a ocorrência de escoamentos mistos.

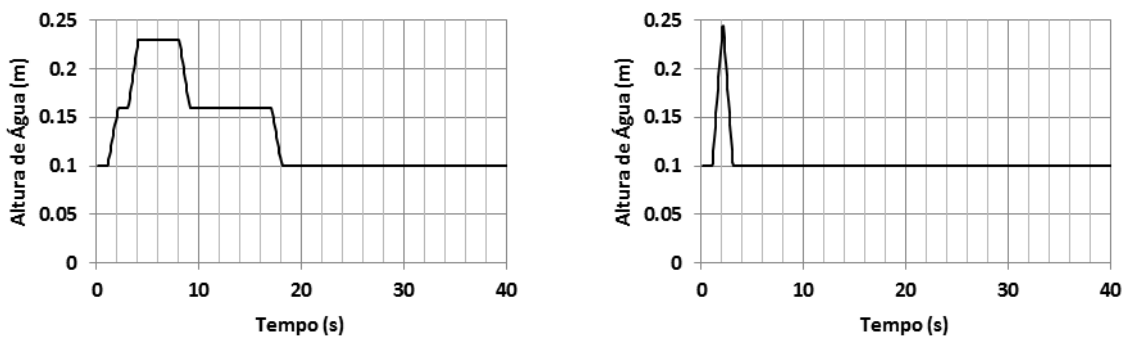


Figura 4 Condições de fronteira de montante CFMp1 e CFMp2

Os resultados correspondentes às duas secções (circular e quadrada) e às duas condições de fronteira (CFMp1 e CFMp2) encontram-se representados na Figura 5.

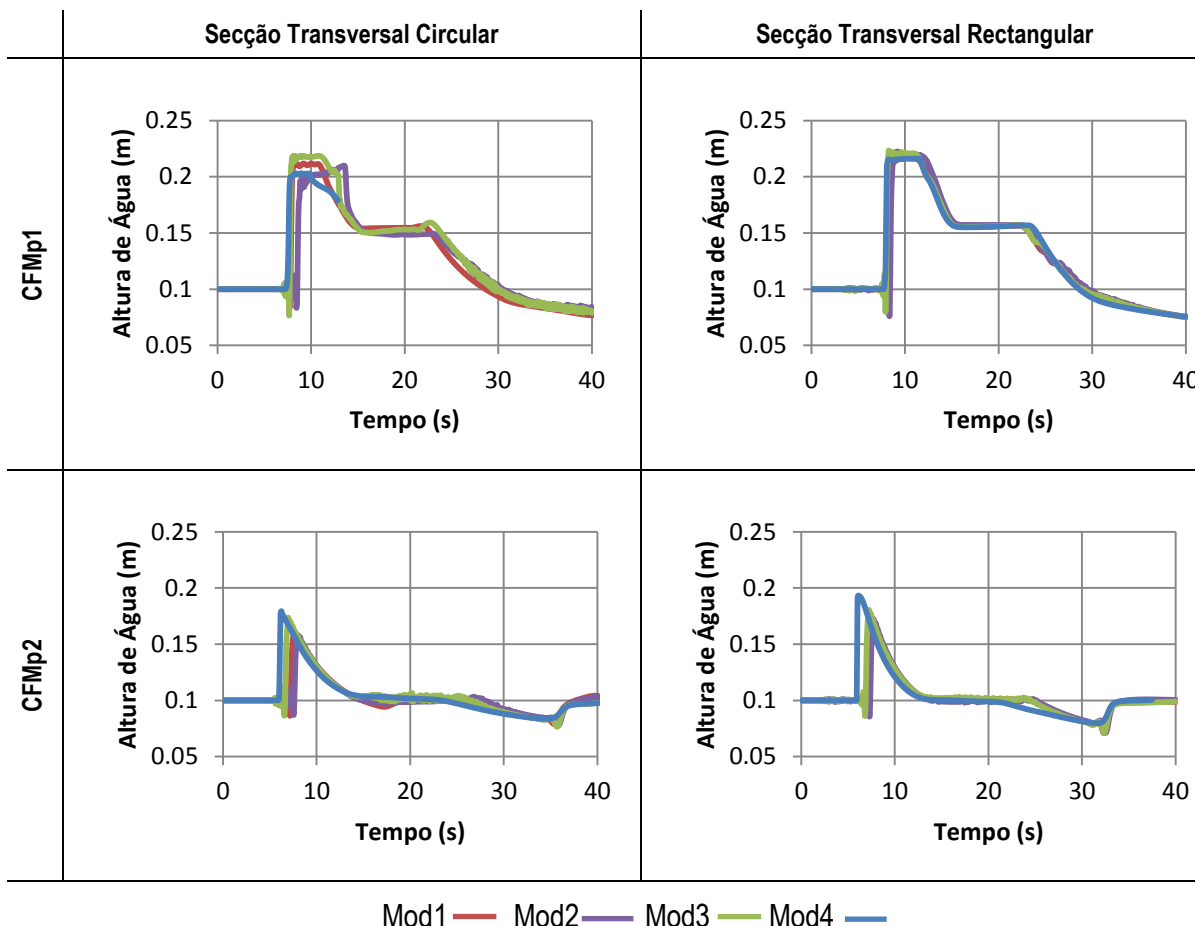


Figura 5 Resultados dos testes de escoamentos mistos

Da análise dos resultados apresentados na Figura 5, ressalta desde logo a discrepância dos resultados obtidos pelos diferentes modelos para o caso do colector de secção circular aquando da aplicação da CFMp1. De facto, a partir do momento em que o colector entra em carga, os vários modelos apresentam diferentes evoluções temporais dos valores da pressão, o que não ocorre no caso de o colector ter secção rectangular.

Em relação à análise dos resultados correspondentes à CFMp2 encontram-se novamente os problemas, já referidos e analisados anteriormente, em relação à exagerada atenuação numérica do “pico” do hidrograma por parte dos modelos que utilizam o esquema de Preissmann.

3.3 Teste Wiggert

O teste de Wiggert (WIGGERT, 1972) é realizado com recurso a um colector de secção rectangular, onde o fluxo é induzido por um hidrograma fixo a montante, criando uma onda que coloca o sistema instantaneamente em carga. A estrutura experimental (Figura 6) baseia-se num colector horizontal de comprimento $L=10\text{m}$, largura $B=0.51\text{m}$ e altura $H=0.148\text{m}$. O número de Manning $1/K$ é igual a 0.012 . As condições iniciais são de $Q_0=0\text{m}^3/\text{s}$ e $h_0=0.128\text{m}$.

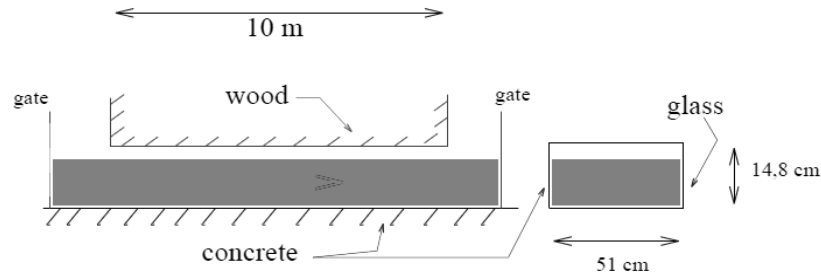


Figura 6 Estrutura experimental (BOURDARIAS and GERBI, 2007).

Em relação às condições de fronteira, a condição de montante será o hidrograma a tracejado da Figura 7 (a), cujo resultado pode ser comparado com o hidrograma estabelecido por Wiggert. O hidrograma anterior foi obtido de uma forma aproximada com base em interpolações de alturas de água em função do tempo. A condição de jusante (Figura 7 (b)) resulta da imposição do nível de água ao longo do tempo com recurso a funções polinomiais: inicialmente $h=h_0$ e quando a onda atinge a saída do canal (altura em que o caudal deixa de ser igual a zero) há um aumento repentino do nível de água (até aos 0.169m) e posteriormente um decréscimo pouco acentuado ajustado a uma função polinomial de 2º grau.

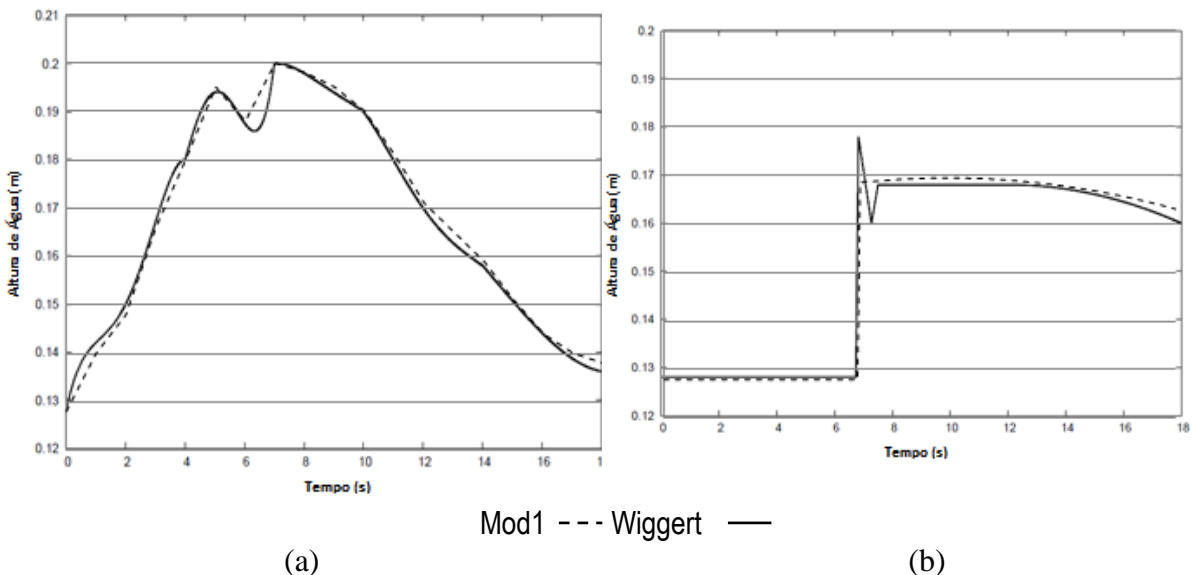


Figura 7 Hidrograma de montante (a) e jusante (b) (BOURDARIAS and GERBI, 2007)

No que toca aos parâmetros da fenda de Preissman, considerou-se um B_{fenda} fictício de 0.002m, correspondendo a uma celeridade $a=19.23\text{m/s}$, dada pela Eq.1, valor próximo do sugerido por WYLIE E STREETER (1993) ($a=20\text{m/s}$). Considerando um $\Delta x=0.1\text{m}$ e $\Delta t=0.1\text{s}$, pode-se agora retirar os resultados que nos vão permitir validá-lo. Na Figura 8 observa-se a evolução temporal da altura de água na secção de controlo distanciada de 3.5m em relação à entrada. O traçado interrompido corresponde aos resultados obtidos através do modelo numérico realizado, o traçado contínuo aos resultados apresentados por BOURDARIAS (2007) e o traçado constituído por círculos corresponde aos resultados experimentais retirados do artigo de Wiggert.

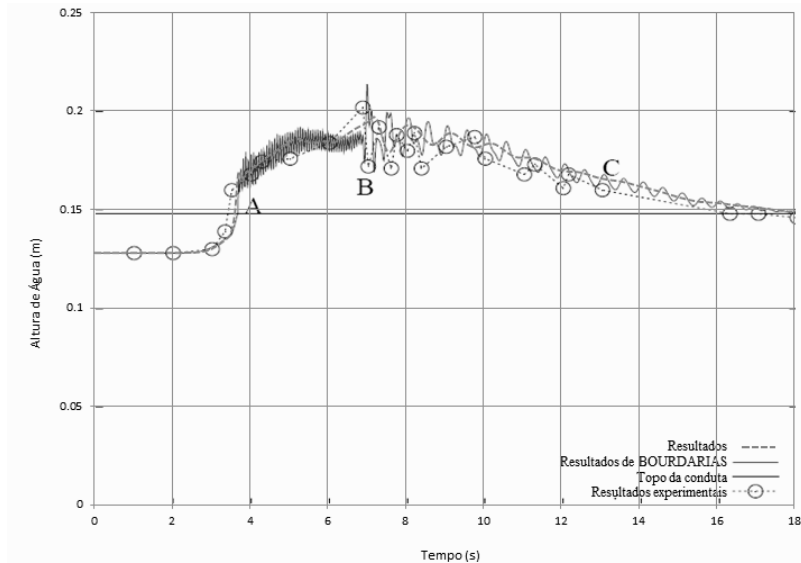


Figura 8 Comparação com os resultados do teste de Bourdarias e Wiggert na secção distanciada 3.5m de montante (BOURDARIAS and GERBI, 2007)

Em relação aos resultados obtidos na secção que dista 3.5m da extremidade montante (Figura 8), a frente de onda, tal como se equacionava, chegou à secção de controlo (zona A) aos 3.6s entrando o colectador instantaneamente em carga. Até à zona B a secção ainda não sentiu os efeitos da onda reflectida a jusante, observando-se uma pressão quase constante não ocorrendo as oscilações numéricas apresentadas por Bourdarias. Por fim, a zona C é caracterizada por ter um comportamento oscilatório da pressão causada pelas reflexões da onda que o Mod1 apesar das representar, não o faz com ondas de tão grande amplitude quando comparadas com as apresentadas pelo modelo de Bourdarias e o resultado experimental de Wiggert.

3.4 Teste de Vasconcelos

Este teste, realizado por VASCONCELOS (2006) para validar o modelo TPA, baseia-se no enchimento de uma conduta até entrar em pressão, partindo de um regime estacionário ($Q_0=0\text{m}^3/\text{s}$). A estrutura laboratorial utilizada consiste numa conduta em acrílico horizontal com $L=14.33\text{m}$ e $D=9.4\text{cm}$. A montante e a jusante existem dois reservatórios, o primeiro de forma paralelepípedica com uma secção $0.25\times 0.25\text{m}$ e altura de 0.31m ; o segundo de forma cilíndrica com $D=0.19\text{m}$, como se pode ver na Figura 9. A altura do tanque cilíndrico é suficiente para que não exista qualquer descarga de caudal através da sua zona superior.

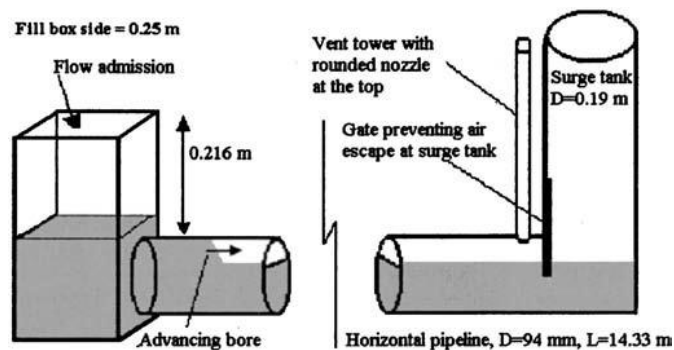
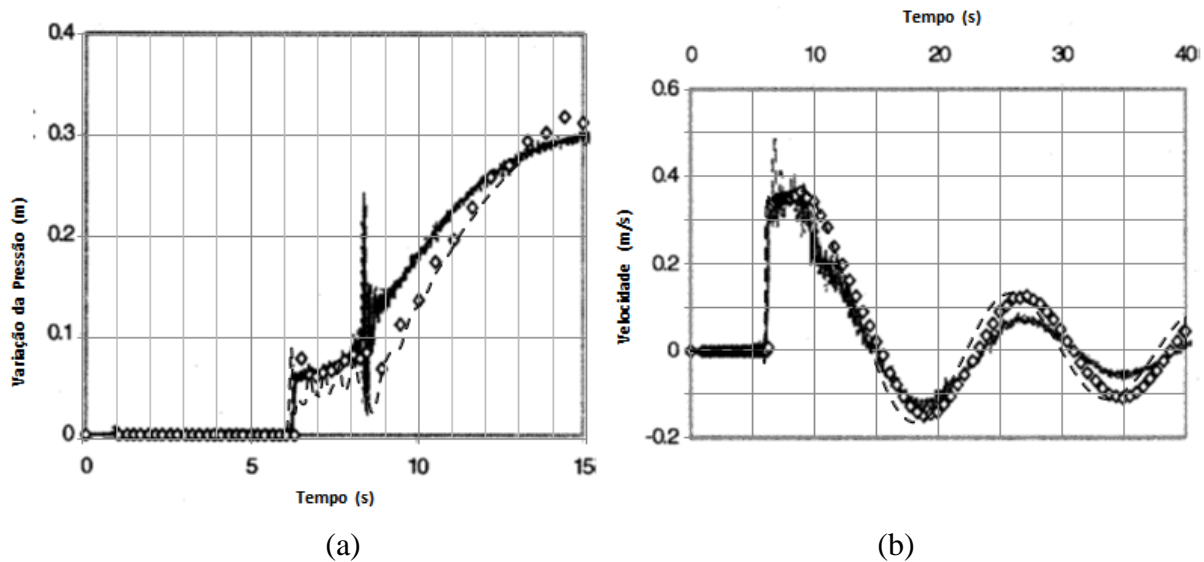


Figura 9 Esquema da estrutura laboratorial (VASCONCELOS et al., 2006)

O caudal de entrada é fixado em 3.1 l/s e o nível de água inicial em 7.3cm (78% do diâmetro da conduta) sem velocidade inicial (repouso como condição inicial). O valor da rugosidade de Manning assumida foi $n=0.012$. Foi considerado $\Delta x=0.1433\text{m}$ e $\Delta t=0.085\text{s}$.

Colocando as condições de reservatório e considerando Δx igual a 0.1433m, Δt igual a 0.085s e uma largura da fenda de Preissmann de 0.00004m ($\alpha=41.4\text{m/s}$, de acordo com a Eq.1), foi possível obter, através do modelo Mod1, os resultados que se apresentam na Figura 10, sobrepostos aos correspondentes resultados obtidos por Vasconcelos (numéricos, através do modelo TPA, e experimentais).



Mod1 - - - TPA — Resultado Experimental \diamond

Figura 10 Gráficos de pressão (a) e velocidade (b) na secção a 9.9m da extremidade de montante e considerando condições de fronteira reservatório com o modelo Mod1

A curva que representa as alturas água em função do tempo, para a secção distanciada 9.9m de montante (Figura 10 (a)), tem um ajuste bastante rigoroso aos resultados experimentais obtidos por Vasconcelos e está isenta de um comportamento oscilatório registado aos 7.5s pelo modelo TPA. Por outro lado, a curva da velocidade em função do tempo, obtida através do Mod1, apresenta um ligeiro atraso em relação à experimental mas uma amplitude correcta, o que não ocorre através da aplicação do modelo TPA (Figura 10 (b)).

4 – CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos para escoamento exclusivamente com superfície livre, é peremptório afirmar que todos os modelos representam adequadamente a resposta das equações de Saint-Venant correspondentes às simulações em que a onda imposta (hidrograma de entrada) tem um comportamento “suave”, ou seja, não é composta por pontos angulosos ou “picos”. Já quando ocorrem estas circunstâncias, os modelos que utilizam uma linearização das equações perdem rigor – Mod1, Mod2 e Mod3. Pode igualmente concluir-se que os modelos que utilizam a discretização em ordem às variáveis (A,Q) são mais instáveis e criam algumas oscilações nos resultados.

Quando se entra no domínio dos testes com superfície livre e pressão (regime misto de escoamento), para o qual este trabalho se direcciona, verifica-se que os resultados obtidos são um

pouco diferentes de modelo para modelo e dependem muito do tipo de secção transversal que se está a utilizar, sendo que os melhores resultados são os apresentados para o colector de secção rectangular.

Os modelos que utilizam a discretização por MDF nas variáveis (A, Q) a par com o modelo que utiliza o MOC, possuem menor versatilidade quando se pretende introduzir equações de fronteira especiais como por exemplo, reservatórios.

O esforço computacional, traduzido através do número de ciclos realizados por cada modelo, é substancialmente superior nos modelos que utilizam a discretização por MDF nas variáveis (A, Q).

A largura da fenda de Preissmann apresenta bons resultados na simulação da pressão da conduta para valores inferiores a 10^{-4} m e valores de celeridade entre os 20 e os 40m/s. Estes valores estão dentro das gamas propostas por outros investigadores. Verificou-se ainda a necessidade do MOC empregar uma fenda de Preissmann com uma transição suave para garantir a convergência da solução, não sendo esta transição necessária no Mod1.

Como conclusão final, comprova-se que o modelo mais versátil a nível da definição das condições de fronteira, com um tempo de cálculo e um esforço computacional razoavelmente pequeno e com resultados bastante aceitáveis nos mais diversos exemplos é o Mod1, o qual utiliza uma formulação das equações de Saint-Venant nas variáveis (Y, Q), com recurso ao esquema de MDF implícito de Preissmann e o artifício da fenda de Preissmann.

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Símbolos	Significado	Unidades SI
a	Celeridade de propagação da onda elástica;	[m/s]
A	Área de secção transversal do fluido;	[m ²]
B_{fenda}	Largura da fenda de Preissmann;	[m]
$f(x,t)$	Função de domínio (x,t);	[-]
g	Aceleração da gravidade;	[m/s ²]
h	Altura da lâmina líquida;	[m]
h_0	Altura inicial do escoamento;	[m]
h_c	Pressão hidrostática da água no CG da sua secção transversal;	[m]
h_s	Altura de pressão;	[m]
H	Altura da conduta de secção rectangular;	[m]
L	Comprimento da conduta;	[m]
n	Valor da rugosidade de Manning;	[-]
Q	Caudal;	[m ³ /s]
Q_0	Caudal inicial;	[m ³ /s]
S_f	Termo de atrito;	[m/m]
S_0	Inclinação do fundo;	[m/m]
t	Tempo;	[s]
V	Velocidade;	[m/s]
x	Espaço;	[m]
Y	Cota piezométrica;	[m]
ΔA	Variação da Área;	[m ²]
Δt	Intervalo de tempo;	[s]
Δx	Intervalo de espaço;	[m]
θ	Coefficiente de ponderação das derivadas no tempo;	[-]

Ψ Coeficiente de ponderação das derivadas no espaço. [-]

Abreviaturas

CF	Condição de Fronteira;
CFM1	Condição de Fronteira de Montante 1;
CFM2	Condição de Fronteira de Montante 2;
CFMp1	Condição de Fronteira de Montante 1 com pressão;
CFMp2	Condição de Fronteira de Montante 2 com pressão;
DD	<i>Dual Drainage</i> – Drenagem Dual;
EDOs	Equações Diferenciais Ordinárias;
EDPs	Equações Diferenciais Parciais;
ESV	Equações de Saint-Venant;
MDF	Método das Diferenças Finitas;
MOC	Método das Características;
SUDS	Sustainable Urban Drainage Systems
TPA	<i>Two-Componente Pressure Approach</i> .

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado pela FCT e pelo programa Operacional Temático Factores de Competitividade (COMPETE), participado pelo Fundo Comunitário Europeu FEDER. O primeiro autor realizou este trabalho com o Estatuto de Bolseiro de Investigação Científica no âmbito do Projecto de Investigação PTDC/AAC-AMB/101197/2008.

BIBLIOGRAFIA

BOURDARIAS, C.; GERBI, S., 2007. "A Finite Volume Scheme for a Model Coupling Free Surface and Pressurised Flows in Pipes". *Journal of Computational and Applied Mathematics* 209, pp. 109-131.

CHAUDHRY, M.H., 1987. "Applied Hydraulic Transients", Second ed. Van Nostrand Reinhold Company Inc., New York, USA.

CUNGE, J.A., 1975. "Two-Dimensional Modeling of Flood Plains", Water Resources Publications, Fort Collins, CO, Mahmood, K., Yevjevich, V. ed. Water Resources Publications, Fort Collins, CO.

CUNGE, J.A.; WEGNER, M., 1964. "Integration Numerique Des Equations D'ecoulement De Barre De St. Venant Par Un Schema Implicite De Differences Finies. Application Au Cas D'une Galerie Tantôt En Charge Tantôt En Surface Libre.". *La Houille Blanche* 1, pp. 33-39.

DE SAINT-VENANT, A.B., 1871. "Thorie Du Mouvement Non-Permanent Des Eaux Avec Application Aux Crues Des Rivires Et L'introduction Des Mares Dans Leur Lit.". *Seances Acad. Sci.*

FORESIGHT, 2004. *Future Flooding Executive Summary*, Office of Science and Technology, HMSO ed, London, pp. 59.

IPCC, 2007. "Mudança Do Clima 2007: A Base Das Ciências Físicas", Paris.

LEANDRO, J.E.T., 2008. "Advanced Modelling of Flooding in Urban Areas Integrated 1d / 1d and 1d / 2d Models". University of Exeter, Exeter.

LIGGETT, J.A.; CUNGE, J.A., 1975. "Numerical Methods of Solution of Un- Steady Flow Equations", *Unsteady Open Channel Flow*, Mahmood, K. And Yevjevich, V. (Eds.), Water Resources Publications, Fort Collins.

PREISSMANN, A., 1961. "Propagation Des Intumescences Dans Les Canaux Et Rivières", 1st Congress of the French Association for Computation (AFCALTI), Grenoble.

SONG, C.S.S.; CARDLE, J.A.; LEUNG, K.S., 1983. "Transient Mixed-Flow Models for Storm Sewers". *J. Hydraul. Eng.*, ASCE 109(11), pp. 1487–1504.

VASCONCELOS, J.G.; WRIGHT, S.J.; ROE, P.L., 2006. "Improved Simulation of Flow Regime Transition in Sewers: Two-Component Pressure Approach". *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE 132(6), pp. 553-561.

WHAMO, 2009. "Water Hammer and Mass Oscillation". US Corps of Engineer.

WIGGERT, D.C., 1972. "Transient Flow in Free-Surface, Pressurized Systems". *Journal of Hydraulic Div.*, ASCE 98(1), pp. 11-27.

WYLIE, E.B.; STREETER, V.L., 1993. "Fluid Transients in Systems". *Prentice-Hall. Upper Saddle River. N.J.*

YOUTUBEVIDEO, 2007. "I Will Never Spit in a Manhole Again!!". Accessed: 17-11-2011. WebPage: <http://www.youtube.com/watch?v=PNdN911X7dk>.