UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL

INFLUÊNCIA DO FATOR DE ATRITO VARIÁVEL NA AVALIAÇÃO DO ESCOAMENTO TRANSITÓRIO EM SISTEMAS HIDRÁULICOS

VIVIEN LUCIANE VIARO

CAMPINAS, S.P. 2001

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL

INFLUÊNCIA DO FATOR DE ATRITO VARIÁVEL NA AVALIAÇÃO DO ESCOAMENTO TRANSITÓRIO EM SISTEMAS HIDRÁULICOS.

VIVIEN LUCIANE VIARO

ORIENTADOR: PROF. DR. EDEVAR LUVIZOTTO JR.

Dissertação de mestrado apresentada à Comissão de pós-graduação da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, na área de concentração de Recursos Hídricos.

CAMPINAS, S.P. 2001.

Vicenter	Atesto que esta é a versão definitiv
NUMBER	da dissertação/tese.
NPANATA	04 12
0070000	Samerellonger "retyronikers" alex
SAURINE STREET	Prot Dr Edevar Lyvizatto JR.
Notion	
No.	Maincula: 20137-0

Nº CHAMADA TIUNICHIND
VGSGX
ALL CONTRACTOR AND ALL CONTRACTOR A
V EX
TOMBO 2C/ 49/16
11 934 10 53.
PROC 16.037100
c DX
ACTION OF A DESCRIPTION
PREÇO 18511,00
DATA
Nº CPD

CM00167663-4

18 10 240595

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

V656 i	Viaro, Vivien Luciane. Influência do fator de atrito variável na avaliação do escoamento transitório em sistemas hidráulicos / Vivien Luciane ViaroCampinas, SP: [s.n.], 2001.
	Orientador: Edevar Luvizotto Jr. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil.
	1. Transitórios hidráulicos. 2. Golpe de ariete. I. Luvizotto Jr., Edevar. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil. III. Título.

	~	(10	× «>	- 54		(r)-4	~	÷	<i>m</i>	e.	<i>g</i> v	9346.Y	23	ia,	:	1.5%	A.)	e e e e e e e e e e e e e e e e e e e	***	æ.	er des	3 70 247	611 b	M-1-2	, zylije,	A. 54	na ha)e.ji.~	p	×~	her 1.	•. ~.	aroden	6.79	or	<i>!•</i> ,	 14
1.11		6	5	9	2			7	0	1	Ģ	,	2	ć	λ.	Ó	3	N	ĝ	W	ŀ.		ŝ,	Ş	¢ :	4	Ŷ	ę			-		ł			. '	j.	\$ 17.47
Warm Color																					·	:	•	•									:	1.0 1		<u>;</u> :	2 2	111111111
And a second																																						1
10111		,																													7 '							·* ·· ·
1.000		e 🗸 ۸			. 20	945	· >~,	217	/72	cont	ieg\$	¢-10	25.14	9Y.2	• • •	200	.1	***	中国	Webdar.	17,893	× -2	w - 2		h in A	<i></i>	or the		; 	2	L.S		- 	3	:		:	

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL

INFLUÊNCIA DO FATOR DE ATRITO VARIÁVEL NA AVALIAÇÃO DE ESCOAMENTOS TRANSITÓRIOS EM SISTEMAS HIDRÁULICOS

VIVIEN LUCIANE VIARO

Dissertação de Mestrado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:

Prof. Dr. Edevar Luvizotto Jr. Presidente e Orientador FEC-UNICAMP

Prof. Dr. Geraldo Lúcio Tiago Filho EFEI-ITAJUBÁ

Prof. In. José Geraldo Pena de Andrade FEC-UNICAMP

Campinas, SP 2001

Dedico:

Aos meus pais e minha irmã, que sempre estão comigo mesmo que distante.

...

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida, saúde e determinação.

Ao prof. Dr. Edevar Luvizotto Jr., que através da sua orientação me deu a oportunidade de compartilhar da sua amizade, apoio nas situações difíceis e a aprimoração dos meus conhecimentos que pretendo passar a diante.

Ao prof. Dr. José Geraldo Pena de Andrade, pela idéia inicial do projeto.

Aos meus amigos André, Carla, Laura, Lydiane, Neusa, Paulão e Rogério que sempre me deram o apoio necessário para o desenvolvimento do trabalho, sendo que alguns, estiveram comigo em momentos muito delicados da minha vida.

Aos funcionários do laboratório de hidráulica pelo auxílio durante a realização dos ensaios.

Aos funcionários do Centro Tecnológico da Unicamp, pelo auxílio na calibração dos equipamentos do laboratório.

À Finep pelo financiamento das instalações laboratoriais apresentadas neste trabalho.

À Fapesp pelo auxílio concedido através da bolsa de mestrado.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	i
LISTA DE TABELAS	iv
LISTA DE SÍMBOLOS	v
RESUMO	vii
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
4. METODOLOGIA	19
4.1 Modelo Matemático	19
4.1.1 Malha de Cálculo	22
4.1.1.1 Caso 1: Método Tradicional	23
4.1.1.2 Caso 2: Modelo Proposto por Brunone	25
4.1.1.3 Caso 3: Modelo Proposto por Vardy	28
4.2 Modelo Físico	34
4.2.1 Descrição do Sistema Hidráulico	34
4.2.2 Aquisição de Dados	42

4.2.3 Cálculo da Vazão	49							
4.2.4 Cálculo do fator de atrito no modelo físico	49							
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO								
5.1 Análise dos resultados obtidos no laboratório	50							
5.2 Aplicação do modelo tradicional	53							
5.3 Aplicação do modelo proposto por Vardy	54							
5.4 Aplicação do modelo proposto por Brunone	55							
5.5 Exemplos de aplicação do modelo proposto por Brunone	56							
6. CONCLUSÕES	63							
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65							
ABSTRACT	69							
ANEXOS								
Anexo A – Programa do modelo proposto por Brunone	70							
Anexo B – Programa do Método Tradicio	76							
Anexo C – Programa do modelo proposto por Vardy	80							

LISTA DE FIGURAS

3.1	Modelo Analítico Simplificado do perfil de escoamento para o regime transitório turbulento	8
3.2	Discretização de um fluxo em um número finitos de cilindros	8
3.3	Reversão de fluxo induzido pelo fechamento brusco da válvula	9
3.4	Malha de cálculo para o MOC com o modelo de atrito	11
3.5	Teste nº 2: Diagrama de pressão e perfis de velocidades com a válvula fechando	16
3.6	Perfis de velocidade no regime permanente	17
3.7	Comparação entre os modelos	18
4.1	Malha regular	22
4.2	Aproximação da função peso (W) por séries exponenciais	29
4.3	Desenho geral do sistema hidráulico	36
4.4	Reservatório hidropneumático	37
4.5	Detalhamento da válvula EVSI-20	37

4.6	Tubulação de cobra no formato espiral	38
4.7	Reservatórios	38
4.8	Filtro F55-R	39
4.9	Microcomputador utilizado no laboratório para a aquisição de dados	39
4.10	Conjunto moto-bomba e o compressor de ar	40
4.11	Transdutor instalado à montante do sistema	40
4.12	Transdutor instalado à jusante do sistema	41
4.13	Tela de apresentação do Aqdados	45
4.14	Entradas analógicas	46
4.15	Parâmetros de ensaio	47
4.16	Ensaio	48
5.1	Resultados dos primeiros ensaios	51
5.2	Resultados dos primeiros ensaios	51
5.3	Segunda etapa de ensaios	52
5.4	Ensaio realizado entre o modelo matemático e o experimental	53
5.5	Ensaio realizado entre o modelo matemático e o experimental	54

•

5.6	Ensaio realizado entre o modelo matemático e o experimental	55
5.7	Ensaio realizado entre o modelo matemático e o experimental	57
5.8	Comparação entre os modelos	58
5.9	Comparação entre os modelos	58
5.10	Ensaio realizado entre os modelos matemáticos e experimental	61
5.11	Ensaio realizado entre os modelos matemáticos e experimental	62

LISTA DE TABELA

4.1 Especificações dos transdutores

42

.

LISTA DE SÍMBOLOS

- A área da seção transversal do tubo não deformado $[L^2]$
- A1, A2 coeficientes da fórmula do termo de atrito adimensional
- a celeridade de propagação da onda de pressão [L/T]
- B1, B2 coeficientes da fórmula do termo de atrito adimensional
- C^+, C^- retas características positiva e negativa
- D-diâmetro da tubulação [L]
- f fator de atrito da fórmula universal da perda de carga adimensional
- g aceleração da gravidade [LT⁻²]
- H carga hidráulica [L]
- k constante de Brunone adimensional
- J-termo de atrito adimensional
- J_s termo de atrito no escoamento permanente adimensional

- L comprimento do tubo [L]
- Q vazão no instante de cálculo atual $[L^{3}T^{-1}]$
- Re número de Reynolds = $\rho VmD/\mu$ adimensional
- t tempo de cálculo [T]
- V velocidade do fluido $[LT^{-1}]$
- W função peso de cálculo da tensão de atrito- adimensional
- Y_{1,t} Y_{2,t}-função Y calculada para o instante de tempo atual adimensional
- Y_{1.t-Δt}, Y_{2,t-Δt} função Y calculada para o instante de tempo anterior adimensional
- ν viscosidade cinemática $[L^2/T^{-1}]$
- τ_{w-} tensão de atrito total adimensional
- τ_{ws} tensão de atrito válida para o regime permanente adimensional
- τ_{wu} tensão de atrito para o regime transitório adimensional
- μ viscosidade dinâmica [ML^2T]
- ψ tempo adimensional

RESUMO

VIARO, Vivien Luciane. Influencia do fator de atrito variável na avaliação do escoamento
Transitório em sistemas hidráulicos. Campinas: 2001. 86 págs. Dissertação de Mestrado.
Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas.

O transiente hidráulico é definido como a transição entre duas condições de escoamento permanente. Nessa transição a variação das grandezas associadas ao escoamento, principalmente a pressão, é importante no dimensionamento e exploração da instalação hidráulica. Os estudos das situações transitórias e das manobras que as provocaram, são fundamentais para se garantir a segurança operacional das instalações hidráulicas em geral. A análise do escoamento transitório em condutos forcados é feita com base nas equações da continuidade e da quantidade de movimento. Uma das imprecisões associadas à modelação convencional está no uso de uma formulação quase-estática para o termo de atrito, a qual é válida somente para escoamento permanente. Este trabalho faz uma comparação entre os resultados obtidos em modelo físico e os da modelação matemática, considerando ou não uma modelação especial para o termo de atrito transitório. Foram utilizados os modelos propostos por Brunone et. al. (1991) e Vardy et. al. (1993), na descrição do termo de atrito variável.

Palavras Chave: Transientes Hidráulicos, fator de atrito variável, método das características

1. INTRODUÇÃO

Nos projetos de sistemas de distribuição de água o estudo do regime transitório foi na maioria das vezes negligenciado. Entretanto a busca pela máxima eficiência na prestação de serviços, tem motivado na atualidade o tratamento mais cuidadoso deste fenômeno na fase de projeto e posteriormente na operação de tais sistemas, prevenindo danos nos diversos componentes advindos de condições operacionais inadequadas.

A possibilidade de antever rapidamente o resultado de manobras e variações acidentais de demanda causadas por fatores emergenciais (incêndio ou rompimentos de tubulações), como por exemplo, no desempenho de válvulas de controle automático, que devem responder de forma adequada as funções de controle e regulação para as quais foram dimensionadas, fazem parte de estudos avançados envolvendo escoamentos transitórios.

Embora as equações que permitem a análise do fenômeno já sejam há muito tempo conhecidos, por algumas simplificações, estas não conseguiam modelar com total exatidão os resultados observados em campo.

Uma das simplificações associadas à modelação do fenômeno transitório é o uso de uma formulação quase-estática para a determinação do termo de atrito, no qual é usual considerá-lo o mesmo do regime permanente.

A imprecisão decorrente desta simplificação, motivou novos estudos com o intuito de desenvolver modelos matemáticos mais realistas para sistemas em condução forçada, durante a ocorrência do fenômeno transitório.

Para avaliar a necessidade da inclusão do efeito dinâmico do escoamento sobre o cálculo do termo de atrito nas equações que regem o escoamento de fluidos em condutos forçados, são necessárias investigações comparando as formulações propostas com modelos físicos de instalação hidráulica em condições de laboratório, o que motivou a elaboração deste trabalho.

2. OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho, foi analisar a influência do fator de atrito no cálculo do transiente hidráulico, verificando a necessidade de incluir a parcela de atrito variável no desenvolvimento do modelo matemático. Foi feita uma comparação entre os resultados experimentais de um sistema hidráulico, durante a ocorrência do regime transitório, com os resultados obtidos através da modelação matemática baseada nos modelos propostos por Brunone et. al. (1991) e Vardy et.al. (1993), para a avaliação do atrito variável.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Denomina-se instalação hidráulica o conjunto de dispositivos hidromecânicos e condutos destinados ao transporte de um fluido. Esses dispositivos tem a função de controlar o escoamento e/ou transformar energia mecânica em energia hidráulica ou vice-versa.

Se as condições de escoamento são alteradas por ações denominadas manobras sobre os componentes da instalação (por exemplo, a abertura ou fechamento de uma válvula), origina-se uma situação na qual as pressões e as vazões irão variar com o tempo, ao longo da instalação, até se acomodarem a uma nova condição permanente.

Ao se estudar uma dada instalação submetida a uma manobra especifica (causa), determina-se o transiente hidráulico (efeito), a situação existente entre as condições extremas (inicial e final) de regime permanente.

Nos projetos de sistemas de distribuição de água, o regime transitório é na maioria das vezes negligenciado. Segundo Sharp (1998), o transiente hidráulico é um fenômeno considerado somente após algum desastre por ineficiência de projeto. Atualmente, com a crescente complexidade dos sistemas hidráulicos, existe uma necessidade de se conhecer melhor seu comportamento, evitando situações adversas.

O trabalho de Walski et al (1994), ilustra as observações anteriores. Os autores analisaram o problema enfrentado na região de Austin (Texas) onde a empresa de serviços públicos identificou o fenômeno do transiente hidráulico como o responsável pela origem de

baixas pressões numa parte da cidade. Mesmo com os três maiores reservatórios nessa região, chegou a faltar água nesta localidade.

Através de um estudo do funcionamento do sistema (a rotina de funcionamento das válvulas e bombas e os reservatórios disponíveis para amenizar as ondas de pressão), foi possível identificar como causa do problema o transitório, correlacionando a curta duração nas quedas de pressão com a magnitude das mudanças de velocidade nas tubulações.

Várias condições do sistema podem determinar influências na ocorrência do fenômeno transitório, o comprimento da tubulação, o comportamento e a localização da válvula, etc. Stewardson et al (2000), realizaram uma investigação sobre as ondas de pressão transitórias, utilizando uma metodologia sistemática experimental, demonstrando que várias condições do sistema podem determinar influências probabilísticas na ocorrência do fenômeno transitório, em decorrência de aberturas e fechamentos simultâneos ou alternados das diversas válvulas do sistema.

Transiente hidráulico é um fenômeno importante que deve ser considerado em redes hidráulicas simples e complexas. Modelos computacionais para a análise de regimes transitórios são usados com grande sucesso em sistemas de topologia simples. Mcinnis et al (1995), descrevem seus estudos para o caso de topologias mais complexas sujeitas à variações de demandas variáveis. A rede de abastecimento da cidade de Calgary (Canadá) utilizada no estudo proposto permitiu algumas conclusões, embora não seja tão complexa, quando comparada à sistemas de distribuição de água com múltiplas zonas de pressão, válvulas de controle, várias estações de bombeamento, reservatórios e outros dispositivos hidráulicos.

Através dos testes desenvolvidos foi possível observar a necessidade de uma relação mais rigorosa entre modelos computacionais de simulação e o comportamento natural do transiente hidráulico em sistemas complexos.

Até a década de 1960, o método gráfico foi utilizado intensamente para a solução dos problemas do regime transitório. Para contemplar o atrito das instalações o método era aplicado

considerando a perda de carga no conduto fixada em suas extremidades, obtendo-se assim uma solução aproximada.

Os avanços na tecnologia contribuíram para que aumentassem o interesse sobre novos modelos, assim os métodos gráficos foram substituídos por modelos numéricos que possibilitaram uma maior exploração de fenômenos que até então, não eram possíveis de análises.

O modelo numérico mais utilizado na análise de escoamentos transitórios, é o método das características (MOC). Este modelo transforma as duas equações a derivadas parciais, válidas em todo o plano *x*-*t*, em equações a derivadas totais, (C^+ e C^-). Essas equações integradas se expressam na forma de diferenças finitas utilizando-se um intervalo de tempo especificado que permite a solução, partindo-se de um instante conhecido (condição inicial). Tais equações permitem a evolução do conhecimento de carga e vazão nos pontos interiores à tubulação. Nos pontos extremos são necessários, para caracterizar as condições de contorno para caracterizar o desempenho físico de cada elemento da instalação, durante o transitório (Andrade, J.G.P., 1994).

Uma análise criteriosa requer maior atenção com relação ao fator de atrito empregado no modelo numérico. Vários modelos de simulação assumem que o modelo elástico, empregue uma perda de carga quasi-estática, utilizando a fórmula universal de perda de carga de Darcy-Weisbach. Entretanto, nos últimos anos surgiram investigações para se conhecer o efeito da incorporação de uma formulação do termo de atrito variável em modelos de simulação para condições transitórias.

Os primeiros a realizarem pesquisas sobre o efeito da inércia do fluido sobre o termo de atrito foram Holmboe e Rouleau (1967), verificando sua influência no cálculo do fator de atrito em regime laminar, através de experimentos. No ano seguinte, Zielke utiliza esses resultados para verificar numericamente o fenômeno utilizando equações básicas do transitório. A expressão a seguir representa esse modelo constituído por uma função peso W que leva em consideração a aceleração local numa seção do conduto nos intervalos de cálculo:

$$\tau_{WU} = \frac{4\mu}{D} \int_{0}^{T} w \frac{\partial U}{\partial t} dt^{*}$$
...(3.1)

no qual:

t, é o tempo de cálculo corrente,

 $t^* = T - t$, é o tempo correspondente a uma iteração anterior;

μ, é a viscosidade dinâmica do fluido em escoamento.

Esta parcela de atrito variável é somada à parcela da condição quase-estática, que se considerava anteriormente.

Arlt (1983) segundo Rocha (1998), comprova a acuracidade da hipótese feita por Zielke de que o termo de atrito (τ) pode ser considerado como sendo a soma de uma componente do regime estável (τ_{WS}) e uma componente do regime variável (τ_{WU}), ou seja:

$$\tau = \tau_{WS} + \tau_{WU} \tag{3.2}$$

Quando τ_{WU} tende à zero, o modelo fica sendo válido somente para o escoamento de regime permanente.

Para o regime turbulento, um fator que interfere no procedimento é a indeterminação do perfil de velocidades durante o intervalo de tempo de cálculo, como observa Vardy (1993). Funk e Wood (1974), admitem que o fluido é composto por duas camadas de escoamento, concêntricas: uma exterior, onde são concentrados os efeitos viscosos do escoamento, cuja característica é a distribuição de velocidades correspondentes ao laminar, e uma camada interior com um perfil de velocidades uniforme de escoamento.



Figura 3.1 – Modelo analítico simplificado do perfil de escoamento para o regime transitório turbulento. (Funk e Wood, 1974).

Vardy (1991), utiliza os perfis de velocidade para analisar os estudos de Zielke (1969) através de uma análise bidimensional para o escoamento turbulento e laminar em uma tubulação permitindo variações temporais. Este estudo foi baseado em uma discretização de um fluido, durante o seu deslocamento, utilizando para isso um número finito de cilindros como observado na figura 3.2.



Figura 3.2 – Discretização de um fluxo em um número finito de cilindros (Vardy et al, 1991).

O método descrito anteriormente foi aplicado inicialmente ao regime laminar, por ser mais simples que o turbulento e também pela disponibilidade de dados experimentais.

Para demonstrar os efeitos transitórios em uma tubulação, foi utilizado o fechamento brusco de uma válvula representado na figura 3.3 no qual pode-se observar uma representação da reversão do fluido.



Figura 3.3 – Reversão do fluxo induzido pelo fechamento brusco da válvula (Vardy et al, 1991).

Trikha (1975), desenvolveu uma formulação alternativa, na qual o histórico de dados é incluído através da incrementação da aproximação de Zielke em cada instante de tempo como se pode verificar na expressão a seguir:

$$\tau w u = \frac{4\mu}{D} (Y_1 + Y_2 + Y_3) \qquad \dots (3.3)$$

onde: Y_1 , Y_2 , Y_3 são funções de tempo e adotadas como sendo inicialmente iguais a zero.

Brunone et.al.(1991), utilizam a soma do termo de atrito, durante o regime permanente, e uma outra parcela que é proporcional á aceleração local do fluido na representação da perda de carga em regime transitório. A expressão sugerida por Brunone está transcrita originalmente abaixo:

$$J = Js + \frac{K}{g}\delta\frac{dv}{dt} \qquad \dots(3.4)$$

Onde Js é o termo de atrito avaliado durante o escoamento permanente, na sua forma clássica, K um coeficiente experimental, g a aceleração da gravidade e δ um operador de Heasivide que é 1 quando $\partial V/\partial t > 0$ ou zero se isto não ocorrer.

Segundo estes autores, o transiente afeta simultaneamente a avaliação do termo de atrito, e a inércia local na equação da quantidade de movimento. Considerando uma nova abordagem com o intuito de corrigir erros computacionais devido à aproximação do termo de atrito e do termo local de inércia, se pode chegar; (Brunone et.al. 1991)

$$J = J_S + \frac{K_3}{g} \left(\frac{\partial V}{\partial t} - a \frac{\partial V}{\partial s} \right) \tag{3.5}$$

onde a é a celeridade de propagação da onda de pressão.

Bughazem e Anderson (1996), tiveram como um dos objetivos avaliar aspectos independentes da aplicação prática do modelo de atrito variável de Brunone (1991), como por exemplo avaliar os melhores valores da constante empírica do K_3 empregadas no método. E em cada implementação prática, o coeficiente foi variado por tentativa e erro comparando os traços experimentais com os valores adquiridos através do modelo computacional.

Uma contribuição desse trabalho foi demonstrar a modificação nas equações características, como se pode verificar para as equações escritas em termos das variáveis de estado, pressão e velocidade:

$$\frac{dv}{dt} + \frac{1}{\rho a}\frac{dp}{dt} + \frac{1}{(1+K_3)}\left[g \operatorname{sen} \theta + \frac{fv|v|}{2d}\right] = 0 \quad \text{ao longo de } \frac{dx}{dt} = \frac{a}{(1+K_3)} \qquad \dots(3.6)$$

$$\frac{dv}{dt} - \frac{1}{(1+K_3)\rho a}\frac{dp}{dt} + \frac{1}{(1+k_3)}\left[g \sin\theta + \frac{fv|v|}{2d}\right] = 0 \quad \text{ao longo de } \frac{dx}{dt} = -a \qquad \dots(3.7)$$

Para esta implementação ocorre a necessidade de uma interpolação adicional para a característica direita da malha regular de acordo com as expressões de interpolação a seguir:

$$\phi_A = \phi_R + \frac{K_3}{K_3 + 1} (\phi_c - \phi_r)$$
 para a interpolação na linha do espaço ...(3.8)

ou

$$\phi_A = \phi_R - K_3(\phi_R - \phi_S)$$
 para a interpolação na linha do tempo ...(3.9)



Figura 3.4 – Malha de Cálculo para o MOC com o modelo de atrito (Bughazem e Anderson,1996).

Sendo impossível estabelecer um valor numérico para o K_3 válido para todos os casos, Vardy e Brown (1996), desenvolveram uma nova expressão para o coeficiente da formulação original de Brunone (1991) afirmando ser influenciado pelo número de Reynolds.

$$K_3 = f_{ul} = 2\sqrt{C^*}$$
...(3.10)

Onde C* é o coeficiente de decaimento que se relaciona ao número de Reynolds, calculado a partir da equação 3.11.

$$C^* = \frac{7.41}{R^k} \tag{3.11}$$

onde o k é:

$$k = \log_{10} \left(\frac{14,3}{R^{0,05}} \right) \tag{3.12}$$

Poll (1999), desenvolveu um Modelo Simulador para a análise do desempenho da válvula de controle interagindo com a rede hidráulica em situação operacional permanente ou transitória. Propõe um método modificado, MOCM, com a inclusão do coeficiente de fator de atrito K_3 , incluindo o termo à formulação básica no método de malha escalonada cruzada.

Este modelo foi ajustado e comparado com os resultados obtidos de ensaios físicos executados no laboratório da empresa Barbará. Foi feita uma série de ensaios de transiente decorrente de abertura ou fechamento de válvula tipo manual, ou ainda, de controle eletro-eletrônico por solenóide.

Dentre as conclusões obtidas neste trabalho, uma das mais importantes é que para simulação de transientes hidráulicos torna-se necessário o uso de um modelo modificado, com a inclusão do coeficiente de fator de atrito K_3 , pois demonstrou grande importância no amortecimento das ondas de choques originadas durante o transiente. O método tradicional (sem a inclusão do fator de atrito variável) não foi capaz de representar corretamente o regime transitório na instalação investigada.

Eichinger e Lein (1992), apresentaram uma outra formulação para a aproximação do termo de atrito durante escoamentos transitórios com alto número de Reynolds. Foi comparada a proposição clássica contra a proposição citada por Vardy, contra ainda uma nova proposição que os autores mencionaram como sendo o atrito baseado na fórmula da potência do atrito.

$$J_{1} = \frac{8}{gU_{m}D^{2}} \int_{0}^{R} (v + v_{1}) \left[2 \left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)^{2} + \left(\frac{\partial U}{\partial r} \right)^{2} \right] r dr \qquad \dots (3.13)$$

A equação permite a integração do termo de atrito utilizando os perfis de velocidade instantânea ao longo da tubulação. Por não se tratar de um equacionamento muito simples é possível existir problemas numéricos quando utilizada em um modelo computacional.

O sistema experimental utilizado no trabalho destes autores foi baseado na tentativa inicial de Holmboe et al (1967), utilizando um reservatório com grandes dimensões, uma tubulação e o fechamento rápido de uma válvula, localizada na extremidade de jusante da tubulação. Para a aplicação dessa formulação foi necessário o conhecimento do desenvolvimento temporal do perfil de velocidades ao longo da tubulação, durante o escoamento.

A importância, a validade e a aproximação numérica do termo atrito nas equações clássicas de transiente hidráulico tem sido o objetivo de investigações em numerosos trabalhos. Como por exemplo, Rocha (1998) que avaliou a influência do termo de atrito no escoamento transitório. Três diferentes modelos foram propostos para a realização das simulações numéricas. No primeiro modelo, o fator de atrito obtido no regime permanente foi considerado constante durante todo o tempo de cálculo. No segundo modelo, o cálculo do fator de atrito foi efetuado para a vazão de cada intervalo de tempo de cálculo, através da fórmula aproximada pela expressão de Pereira e Almeida. No terceiro modelo foi considerado o efeito de inércia da massa de fluido no cálculo do termo de atrito durante os intervalos de tempo de cálculo do regime permanente, como proposto por Vardy (1993).

As análises feitas no trabalho de Rocha (1998), demonstraram que no amortecimento do fenômeno diferenças significativas foram observadas. Para aplicação mais prática em problemas de engenharia, pode-se adotar um modelo intermediário, ou seja, atualizar o fator de atrito para cada intervalo de tempo de cálculo.

Um sistema de abastecimento de água complexo é formando através da conexão de subsistemas que inicialmente foram projetados para trabalharem separadamente. Nas junções destes subsistemas, às vezes são instaladas válvulas de controle automático (VCA). Brunone et al (1999), com o objetivo principal de analisar o fenômeno transitório oriundo do comportamento

das VCAs, utilizaram o sistema de abastecimento de água da Azienda Servizi Territorial (AST) da cidade Recanati, localizada à nordeste de Roma (Itália).

No modelo matemático o cálculo do fator de atrito segue a expressão original onde o fator de atrito variável é considerado como um fator dependente da velocidade local e da velocidade de propagação, e o fator de atrito permanente é obtido pelo diagrama de Moody. Já para o cálculo do coeficiente k foi determinada uma expressão:

$$h_n - h_{n-1} = \frac{1}{1 + K^2} \tag{3.14}$$

No qual $h_n e h_{n-1}$ refereÀse a diferença entre dois picos de pressão durante dois períodos consecutivos qualquer.

Vitkovsky et al (2000), investigam o desempenho de vários sistemas com a implementação do fator de atrito variável, durante a ocorrência do transiente hidráulico.

No desenvolvimento da pesquisa, os autores utilizaram inicialmente a malha regular na aplicação dos modelos de derivações explícita e implícita. No qual foi observada uma instabilidade atribuída à existência de duas malhas independentes de cálculo no mesmo plano, causando problemas de convergência e de precisão no processo de cálculo.

Já na análise da parcela do atrito variável, foi aplicada uma extensão do modelo proposto por Brunone (1991), desenvolvida por Vardy e Brown (1996) que relaciona a variação do coeficiente K com o coeficiente de decaimento (C*).

Como um dos resultados desse estudo foi comprovado a eficiência do modelo baseado em Vardy et al (1996), através da sua comparação com os resultados experimentais e com o comportamento do modelo proposto originalmente por Brunone et al (1991). Brunone et al (2000), apresentam um estudo preliminar do escoamento transitório considerando uma relação entre a velocidade e o tempo, utilizando-se medições feitas através de um taquímetro ultrassônico (Fig 3.5).

O modelo experimental utilizado nesse estudo foi instalado no laboratório de hidráulica da Universidade de Perúgia. Composto de um reservatório, bombas, vaso de pressão, 352 metros de uma tubulação de polietileno com um diâmetro interno de 93.8 mm, concentrada numa estrutura circular com raio interno de 1.5m, e uma válvula esférica.

Foram examinadas especificamente a aceleração e a desaceleração do fluido com uma alta resolução temporal e espacial, com isso foi possível observar as diferenças no perfil de velocidades durante o regime transitório em relação o perfil do regime permanente, conforme se observa nas figuras 3.5 e 3.6.



Figura 3.5 -teste nº 2: Diagrama de pressão e perfis de velocidade com a válvula fechando. (Brunone et al, 2000).



Figura 3.6 -Perfis de velocidade no regime permanente (Brunone et al, 2000a).

Utilizando a mesma estrutura experimental, Brunone et al (2000) desenvolve estudos de comparação entre o modelo matemático que considera o fator de atrito válido para o regime permanente. No desenvolvimento do modelo matemático é considerada para o cálculo do coeficiente K a expressão 3.15.

$$\frac{y_n}{y_{n-1}} = \left(\frac{1}{1+K}\right)^2 \dots(3.15)$$

No qual $y_n e y_{n-1}$ refere-se à diferença entre dois picos de pressão durante dois períodos consecutivos quaisquer.

Os resultados dessa comparação podem ser observados através da figura 3.7, na qual os autores comprovam a necessidade de se desenvolver modelos computacionais mais coerentes com o comportamento real durante o fenômeno transitório.



Figura 3.7- Comparação entre os modelos (Brunone et al ,2000b).

4. METODOLOGIA

4.1 MODELO MATEMÁTICO

Na análise de regimes transitórios é tradicional a abordagem dinâmica elástica. O caráter geral de suas equações permite também a análise de escoamentos em regime permanente e oscilatório. Entende-se por regime permanente na análise de escoamentos em condutos forçados, as condições de escoamento em que os valores médios das grandezas G, associadas a pontos fixos neste escoamento, não variam no tempo, observando que a escala de tempo adotada seja bem superior à das flutuações turbulentas destas grandezas.

O regime será dito variável, se as grandezas G, associadas ao ponto variarem no tempo. Se o regime variável é uma situação intermediária de ajuste entre um regime permanente inicial e uma nova situação de regime permanente, este regime variável será dito transitório. Por outro lado, caso um regime permanente final não seja estabelecido, e as grandezas G, apresentem valores oscilando com características periódicas, diz-se que o regime variável é oscilatório (Luvizotto Jr, 1995).

A análise do escoamento transitório em condutos forçados é feita com base nas equações da continuidade e da quantidade de movimento, que permitem descrever as variações de carga e de vazão no tempo ao longo da tubulação.

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{gA} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (\text{equação da continuidade}) \qquad \dots (4.1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + \pi D \frac{\tau}{\rho} = 0 \quad (\text{equação da quantidade de movimento}) \qquad \dots (4.2)$$

O par de equações formado por 4.1 e 4.2 gera um sistema de equações a derivadas parciais do tipo hiperbólico, não integráveis analiticamente. Várias técnicas numéricas e gráficas de solução para este sistema de equações já foram propostas, entretanto o método das características é a mais empregada.

Gerando um sistema com as equações 4.1 e 4.2, atentando para o conceito de derivada total e combinando-as de forma adequada, pode-se obter as derivadas totais de carga e vazão.

$$L = \lambda L 1 + L 2 \qquad \dots (4.3)$$

onde λ é um coeficiente que deverá ser determinado, e L1 e L2 são respectivamente:

$$L1 = \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{gA} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \qquad \dots (4.4)$$

$$L2 = \frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{fQ[Q]}{2DA} = 0 \qquad \dots (4.5)$$

resultando em:

$$\lambda \left(\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{gA}{\lambda}\frac{\partial H}{\partial x}\right) + \left(\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\lambda a^2}{gA}\frac{\partial Q}{\partial x}\right) + \frac{fQ|Q|}{2DA} = 0 \qquad \dots (4.6)$$

de onde se observa que os termos entre parênteses representam derivadas totais, desde que os termos multiplicadores das derivadas parciais em x sejam uma velocidade de transporte, ou seja:

$$\frac{gA}{\lambda} = \frac{\lambda a^2}{gA} = v = \frac{dx}{dt} \qquad \dots (4.7)$$

o que implica na relação:

$$\lambda^2 = \left(\frac{gA}{a}\right)^2 = \lambda = \pm \frac{gA}{a} \qquad \dots (4.8)$$

ou seja

$$V = \frac{dx}{dt} = \pm a \tag{4.9}$$

na qual indica a existência de duas velocidades de transporte, que satisfazem a equação 4.6, gerando dois novos conjuntos de equações válidos aos pares:

$$C^{+} \begin{cases} \frac{dH}{dt} + \frac{a}{gA} \frac{dQ}{dt} + \frac{4}{D} \frac{\tau}{\rho} \frac{a}{g} = 0\\ \frac{dx}{dt} = a \end{cases} \dots (4.10 \text{ a,b})$$

$$C^{*} \begin{cases} -\frac{dH}{dt} + \frac{a}{gA}\frac{dQ}{dt} + \frac{4}{D}\frac{\tau}{\rho}\frac{a}{g} = 0 \\ \frac{dx}{dt} = -a \end{cases} \dots (4.11 \text{ a,b})$$

Ao se transformar as equações diferenciais parciais do tipo hiperbólico em equações de derivadas totais, a avaliação da evolução das cargas e vazões ao longo da tubulação e ao longo do tempo serão válidas sobre uma malha adequadamente discretizada no plano x,t.
4.1.1 MALHA DE CÁLCULO

Ao conjunto de pontos discretizados no plano (x,t) nos quais a solução numérica será obtida, a partir da condição inicial, de forma progressiva para os instantes seguintes é denominado malha de cálculo. Através da sua aplicação pode-se obter resultados para as variáveis $H \in Q$ em cada instante.



Figura 4.1 - Malha Regular

Através dessa figura pode-se observar um exemplo de malha regular onde é possível calcular as variáveis H_P (carga) e Q_P (vazão), em um ponto genérico P, no instante $t + \Delta t$, a partir dos valores conhecidos dos pontos A e B no instante anterior t, utilizando as equações 4.10 e 4.11 válidas ao longo das retas características C^+ e C.

4.1.1.1 CASO 1 : MÉTODO TRADICIONAL

Caracterizando a forma clássica de análise do fenômeno transitório em condutos forçados, observa-se que a parcela de atrito é constituída por um valor de f ($\tau = \tau_{WS}$) obtida em termos das condições de regime permanente e, portanto tratando-se de uma simplificação da condição real.

Adotando:

$$\frac{\tau_{WS}}{\rho} = \frac{fV|V|}{8} = \frac{fQ|Q|}{8A^2} \qquad \dots (4.12)$$

e substituindo no conjunto de equações 4.10 e 4.11, obtém-se:

$$C^{+}\begin{cases} \frac{dH}{dt} + \frac{a}{gA}\frac{dQ}{dt} + \frac{fQ|Q|}{2gDA^{2}} = 0\\ \frac{dx}{dt} = a \end{cases} \dots (4.13 \text{ a,b})$$

$$C^{-} \begin{cases} -\frac{dH}{dt} + \frac{a}{gA}\frac{dQ}{dt} + \frac{fQ|Q|}{2gDA^{2}} = 0\\ \frac{dx}{dt} = -a \end{cases} \qquad \dots (4.14 \text{ a,b})$$

A integração das equações 4.13 e 4.14 é realizada utilizando a malha regular, sobre a reta característica (C^+) passando pelos pontos $A \in P$ e sobre a reta característica (C) passando pelos pontos $B \in P$.

equações que regem a reta característica positiva:

$$C_A = H_A + B Q_A \tag{4.15}$$

$$B_A = B + R |Q_A| \qquad \dots (4.16)$$

$$H_{p} = C_{A} + B_{A}Q_{p} \qquad \dots (4.17)$$

equações que regem a reta característica negativa:

$$C_B = H_B - BQ_B \qquad \dots (4.18)$$

$$B_B = B + R |Q_B| \qquad \dots (4.19)$$

$$H_{\rm P} = C_{\rm B} - B_{\rm B} Q_{\rm P} \qquad \dots (4.20)$$

Através da equação 4.21 pode-se calcular a vazão no ponto P.

$$Q_{P} = \frac{C_{B} - C_{A}}{B_{A} + B_{B}}$$
...(4.21)

onde:

$$B = \frac{a}{gA} \tag{4.22}$$

$$R = \frac{f}{2gDA^2} \qquad \dots (4.23)$$

4.1.1.2 CASO 2 : MODELO PROPOSTO POR BRUNONE.

Admitindo que o termo de atrito é a soma do termo de atrito estático, durante o regime permanente, e uma outra parcela que é proporcional à aceleração local do fluido, é aplicado esse modelo considerando a variação da vazão em relação à x ou por t, no desenvolvimento da derivada total.

Adotando: $\tau = (\tau_{wu} + \tau_{ws})$, onde:

$$\frac{\tau_{WS}}{\rho} = \frac{fV|V|}{8} = \frac{fQ|Q|}{8A^2} \dots (4.24)$$

$$\frac{\tau_{WU}}{\rho} = K \left(\frac{\partial Q}{\partial t} - a \frac{\partial Q}{\partial x} \right) \qquad \dots (4.25)$$

obtém-se:

$$C^{+} \begin{cases} \frac{dH}{dt} + \frac{a}{gA} \frac{dQ}{dt} + \frac{a}{gA(1+K)} \frac{fQ|Q|}{2DA} = 0\\ \frac{dx}{dt} = \frac{a}{(1+K)} \end{cases} \dots (4.26 \text{ a,b})$$

$$C^{-} \begin{cases} -\frac{dH}{dt} + \frac{a}{gA}\frac{dQ}{dt} + \frac{afQ|Q|}{2gDA^{2}} = 0\\ \frac{dx}{dt} = -a \end{cases} \qquad \dots (4.27 \text{ a,b})$$

Este equacionamento requer uma interpolação para a característica direita e isso pode ser executado através das equações abaixo:

$$\phi_A = \phi_R + \frac{K}{(K+1)} (\phi_C - \phi_R) \quad \text{interpolação em x} \qquad \dots (4.28)$$

$$\phi_A' = \phi_R - K(\phi_R - \phi_S)$$
 interpolação em t ...(4.29)

Equações que regem a reta característica positiva, nesse modelo:

$$C^{+} \begin{cases} \frac{dH}{dt} + \frac{a}{gA} \frac{dQ}{dt} + \frac{a}{gA(1+K)} \frac{fQ|Q|}{2DA} = 0\\ \frac{dx}{dt} = \frac{a}{(1+K)} \end{cases} \dots (4.30 \text{ a,b})$$

Aplicando todos os outros procedimentos matemáticos definidos anteriormente, chegamos às equações 4.15 e 4.16 para C_A e B_A e apenas com uma passagem a mais no desenvolvimento final desse modelo, onde os valores de H_A e Q_A (equações 4.32 e 4.31) são obtidos por interpolações.

$$C_A = H_A + BQ_A \qquad \dots (4.15)$$

$$B_A = B + R[Q_A] \qquad \dots (4.16)$$

$$Q_A = Q_R + \frac{K}{(K+1)}(Q_C - Q_R)$$
 ...(4.31)

$$H_{A} = H_{R} + \frac{K}{(K+1)} (H_{C} - H_{R})$$
...(4.32)

No caso das equações que regem a reta característica negativa no modelo proposto por Brunone, não é necessário aplicar a interpolação.

$$C^{-}\begin{cases} -\frac{dH}{dt} + \frac{a}{gA}\frac{dQ}{dt} + \frac{afQ|Q|}{2gDA^{2}} = 0\\ \frac{dx}{dt} = -a \end{cases} \qquad \dots (4.33 \text{ a,b})$$

.

$$C_B = H_B - B_K Q_B \qquad \dots (4.34)$$

$$B_{B} = B_{K} + R |Q_{B}| \qquad ...(4.35)$$

$$H_P = C_B - B_B Q_P \qquad \dots (4.20)$$

através da equação 4.21 é possível obter a vazão no ponto P:

$$Q_{P} = \frac{C_{B} - C_{A}}{B_{A} + B_{B}}$$
...(4.21)

onde:

$$B = \frac{a}{gA} \tag{4.22}$$

$$R = \frac{f}{2gDA^2} \dots (4.23)$$

$$B_K = \frac{B}{(K+1)} \tag{4.36}$$

4.1.1.3 CASO 3 : MODELO PROPOSTO POR VARDY.

O modelo proposto por Vardy et al (1993) segue as hipóteses formuladas por Zielke para o regime laminar do fluxo. A expressão a seguir formada por uma função peso W, que leva em consideração a aceleração local em uma seção do conduto para qualquer intervalo de tempo de cálculo, representa o modelo proposto por Zielke (1968):

$$\tau_{WU} = \frac{4\mu}{D} \int_{0}^{T} w \frac{\partial U}{\partial t} dt$$

no qual:

t, é o tempo de cálculo corrente,

 $t^* = T - t$, é o tempo correspondente a uma iteração anterior;

μ, é a viscosidade dinâmica do fluido em escoamento.

Trikha (1975) desenvolve uma fórmula alternativa, no qual o histórico de dados é incluído através do incremento de aproximação de Zielke (1968) em cada intervalo de tempo, como se pode verificar na expressão a seguir:

$$\tau_{WU} = \frac{4\mu}{D} \left(Y_1 + Y_2 + Y_3 \right)$$

onde: Y_1 , Y_2 , Y_3 são funções de tempo e adotadas como sendo inicialmente iguais a zero.

Vardy (1993) desenvolve uma aproximação para a função peso (W) da mesma forma que Trikha (1975), a partir da expressão desenvolvida por Zielke (1968).

$$W_{ap}(\psi) \cong \left(A_1 e^{-B_1 \psi} + A_2 e^{-B_2 \psi} + \dots\right) \qquad \dots (4.37)$$

onde $\psi = \frac{vt^*}{R^2}$ o tempo adimensional.

Trikha (1975) afirma que a precisão dessa função depende diretamente da quantidade de termos inseridos nesta série, mas Vardy (1993) determina que apenas dois termos da função a tornam suficientemente precisa devido à pequena variação do ψ .

A dedução de valores numéricos para os coeficientes e expoentes da equação (4.37) podem ser conseguidas, minimizando-se o erro da função através da:

$$E = \sum \left\{ W - \left(A_1 e^{-B_1 \psi} + A_2 e^{-B_{21} \psi} + \ldots \right) \right\}^2 \qquad \dots (4.38)$$

na qual o somatório é avaliado por finitos valores de ψ . Através da figura 4.3 pode-se observar as aproximações típicas utilizando apenas dois termos nas séries.



Figura 4.2 – Aproximação da função peso (W) por séries exponenciais (Vardy, 1993)

Quando os coeficientes e expoentes A_1 , A_2 , B_1 , B_2 , são conhecidos, eles podem ser usados para atualizar os valores de Y_1 , Y_2 ,, na equação simplificada que Trikha desenvolveu a partir da expressão do termo de atrito para o regime laminar de Zielke:

$$\tau_{WU} = \frac{4\mu}{D} \left(Y_{1,t} + Y_{2,t} \right) \tag{4.39}$$

A função Y_i decai exponencialmente durante o tempo, sendo incrementada pelo último termo da equação (4.39) a seguir:

$$t = 0 \Longrightarrow Y_i = 0 \qquad \dots (4.40)$$

$$t > 0 \Longrightarrow Y_{i,t} =_{i,t-\Delta T} e^{-B_1 \Psi^*} + A_1 (V_1 - V_{t-\Delta T}) \qquad \dots (4.41)$$

sendo $\psi^* = 4 v t^* / D^2$

Vardy (1993) admite que a aproximação obtida com a função peso (w_{ap}) justifica seu uso. Tal aproximação é válida para o regime transitório turbulento de escoamento e foi conseguida com os seguintes valores dos expoentes igual a :

$$A_1 = 365$$
 $B_1 = 12000$ $A_2 = 35$ $B_2 = 5000$

os valores, acima apresentados, são válidos para $5 \times 10^{-7} \le \psi \le 5 \times 10^{-5}$.

A expressão que determina o termo de atrito para o regime transitório turbulento, de acordo com este modelo proposto por Vardy pode ser expresso da seguinte forma:

Adotando: $\tau = (\tau_{wu} + \tau_{ws})$, onde:

$$\frac{\tau_{WS}}{\rho} = \frac{fV|V|}{8} = \frac{fQ|Q|}{8A^2} \dots (4.22)$$

$$\frac{\tau_{WU}}{\rho} = \frac{4\nu}{D} (Y_1 + Y_2)$$
...(4.42)

no qual:

$$y_{1,t} = Y_1 * \exp(-B_1 * psi) + \left(\frac{A_1}{A}\right) * (Q - Qt)$$
 ...(4.43)

$$y_{2,t} = y_2 * \exp(-B_2 * psi) + \left(\frac{A_2}{A}\right) * (Q - Qt)$$
 ...(4.44)

onde:

Q = vazão na seção no instante t; Qt = vazão na seção no instante t- dt;

Aplicando o termo de atrito para o regime transitório na equação de quantidade de movimento e efetuando certas operações matemáticas chegamos a seguinte formulação:

$$\begin{cases} \pm \frac{dH}{dt} + \frac{a}{gA} \frac{dQ}{dt} + \frac{faQ|Q|}{2gDA^2} + \frac{16v}{D^2} (Y_1 + Y_2) \frac{a}{g} \\ \frac{dx}{dt} = \pm a \end{cases} \dots (4.45 \text{ a,b})$$

A integração da equação (4.45) é realizada utilizando a malha regular demonstrada na figura 4.1, sobre a reta característica (C⁺) passando pelos pontos $A \in P$ e sobre a reta característica (C⁻) passando pelos pontos $B \in P$. Através desse processo chegamos as equações demonstradas a seguir:

chamando:

$$C_{f} = \frac{(16*\nu)}{g*D^{2}} (y_{1,t} + y_{2,t}) * dx \qquad \dots (4.46)$$

equações que regem a reta característica positiva:

$$C_A = H_A + BQ_A + C_f \qquad \dots (4.47)$$

$$B_A = B + R |Q_A| \qquad \dots (4.16)$$

$$H_{_{P}} = C_{_{A}} - B_{_{A}}Q_{_{P}} \qquad \dots (4.17)$$

equações que regem a reta característica negativa:

$$C_{B} = H_{B} - BQ_{B} - C_{f} \qquad \dots (4.48)$$

.

$$B_B = B + R |Q_B| \qquad \dots (4.19)$$

$$H_P = C_B - B_B Q_P \qquad \dots (4.20)$$

através da equação 4.21 é possível obter a vazão no ponto P:

$$Q_{P} = \frac{C_{B} - C_{A}}{B_{A} + B_{B}} \dots (4.21)$$

onde:

$$B = \frac{a}{gA} \tag{4.22}$$

$$R = \frac{f}{2gDA^2} \dots (4.23)$$

4.2 MODELO FÍSICO

4.2.1 DESCRIÇÃO DO SISTEMA HIDRÁULICO:

O modelo experimental utilizado neste trabalho encontra-se instalado no laboratório de hidráulica da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas (Fig. 4.3).

O modelo físico é composto basicamente de 2 reservatórios, que se encontram localizados à montante, 252 metros de tubulação de cobre com um diâmetro interno de 20 mm, conjunto motor-bomba, filtro F55-R, reservatório hidropneumático e uma válvula solenóide.

A tubulação encontra-se concentrada numa estrutura circular com raio de 2 metros, com o intuito de evitar os efeitos circulares sobre o sistema hidráulico, utilizado no trabalho de Brunone et al (2000).

O conjunto motor-bomba foi instalado de tal maneira que pudesse ser associada em série ou em paralelo. No desenvolvimento desse trabalho foi utilizado o primeiro caso, no qual as alturas de elevação de cada bomba foram somadas para produzir a altura total de elevação do sistema.

O reservatório hidropneumático tem a finalidade de amortecer as ondas de pressão ocasionadas pelo fenômeno transitório. É abastecido por ar comprimido pelo compressor acionado manualmente.

Para efeito das simulações computacionais, o conjunto bomba-reservatório hidropneumático foi considerado como um reservatório de nível constante com uma cota de 52 metros (carga hidráulica obtida no interior do vaso de pressão).

34

O filtro instalado próximo aos reservatórios, tem como finalidade evitar que impurezas na água interfiram na determinação do coeficiente de atrito variável durante o transiente hidráulico.

Devido à própria disposição dos equipamentos da instalação, foi adotado como manobra geradora do fenômeno transitório, o fechamento brusco da válvula solenóide localizada à jusante do reservatório.

Na execução dos ensaios, foi seguida uma seqüência no seu desenvolvimento. Inicialmente foram abastecidos os reservatórios até uma cota suficiente para abastecer o sistema. Em seguida o acionado do compressor de ar, até alcançar o valor definido para os ensaios (50 mca) e conseqüentemente o conjunto motor-bomba para distribuir água na tubulação.

Para eliminar qualquer interferência na realização dos ensaios, foi necessário um tempo de espera para eliminar completamente o ar contido no interior da tubulação.



Figura 4.3 – Desenho geral do sistema hidráulico.

A seguir apresentam-se as figuras com detalhes dos equipamentos do sistema hidráulico utilizado em laboratório.



Figura 4.4 - Reservatório Hidropneumático.



Figura 4.5 - Detalhamento da válvula EVSI-20.



4.6 - Tubulação de cobre no formato espiral.



Figura 4.7 - Reservatórios.



Figura 4.8 – Filtro F55-R



Figura 4.9 – Microcomputador utilizado no laboratório para a aquisição de dados.



Figura 4.10 – Conjunto moto - bomba e o compressor de ar.



Figura 4.11 – Transdutor instalado à montante do sistema.



Figura 4.12 – Transdutor instalado à jusante do sistema.

4.2.2 AQUISIÇÃO DE DADOS

A coleta de dados de pressão do modelo físico, foi feita através de transdutores de pressão instalados em locais específicos do sistema, conforme indicado nas figuras 4.11 e 4.12, ou seja, na saída do reservatório hidropneumático e na extremidade de montante da válvula solenóide. As especificações dos transdutores utilizados, seguem a tabela abaixo:

TRANSDUTORES	FABRICANTE	TIPO	ESCALA NOMINAL	Nº DE SÉRIE	SENSIBILIDADE		
INÍCIO DO SISTEMA	SODMEX	HMI-2290	0-50 MCA	6070	1,923 MV/V		
À MONTANTE DA VÁLVULA	TRANSTEC	HMI-2300	0-200 MCA	7058	1,960 MV/V		

 Tabela 4.1
 Especificações dos Transdutores

Os sinais dos transdutores de pressão (em mV), devem ser amplificados em tensões elétricas variando dentro de uma faixa de aceitação do canal de entrada da interface, que neste caso é de 0 a 5V. Esta interface se trata de um conversor AD (analógica/digital) de 12 bits, da Lynx de 16 canais de aquisição, no qual as medições são traduzidas em valores de pressão observados através dos gráficos realizados durante os experimentos.

Para obtenção dos dados de pressão através desta interface foi utilizado um programa específico para esta finalidade, o Aqdados, que utiliza a plataforma Windows e possui como um dos recursos a possibilidade de demonstrar através de gráficos a evolução do fenômeno transitório durante um tempo pré-determinado.

Para utilizar o Aqdados, é necessário seguir certos procedimentos que serão apresentados como passos, para converter os sinais dos transdutores em valores de pressão.

• Passo 1 – Identificar as características de cada transdutor utilizado no sistema hidráulico:

Transdutor 01 Localização: no início do sistema. Sensibilidade: 1,923 mV/volt Tensão: 5 volts Escala Nominal: 0 - 50 mca

Transdutor 02 Localização: a montante da válvula solenóide Sensibilidade:1,960 mV/ volt Tensão: 5 volts Escala Nominal: 0 – 200 mca

• Passo 2 – Verificar internamente, o valor da resistência que determina o fundo de escala da interface.

O aparelho utilizado foi verificado e encontrou-se o valor de 200Ω .

• Passo 3 – Com o intuito de se obter um valor exato para a resistência interna, utiliza-se a seguinte fórmula: Ri= $1 + \frac{40000}{R_s}$.

Onde : $R_8 = 200\Omega$.

O valor encontrado para a resistência interna (Ri) foi de 201.

• Passo 4 – Identificado a sensibilidade do transdutor e a tensão na qual está sendo utilizada na interface, multiplicam-se os dois valores anteriores. Em cima desse valor determina-se o intervalo mais próximo dentre os especificados pelo programa Aqdados.

Transdutor $01 \Rightarrow 1,932 \Rightarrow$ intervalo mais próximo $\Rightarrow -2,50/2,50$ Transdutor $02 \Rightarrow 1,969 \Rightarrow$ intervalo mais próximo $\Rightarrow -2,50/2,50$

• Passo 5 – Para determinar o valor máximo de pressão, se estabelece uma relação entre o valor escolhido e o real e em seguida multiplica-se pelo valor limite de pressão especificado no transdutor.

Transdutor
$$01 \Rightarrow \frac{2,50}{1,932} * 50 = 64,77 \text{ mca.}$$

Transdutor
$$02 \Rightarrow \frac{2,50}{1,969} * 200 = 253,94$$
 mca.

Com esses valores delimitados, determinam-se os fundos de escala superior e inferior que devem ser inseridos no programa, juntamente com o intervalo de voltagem utilizado durante o experimento. Os procedimentos desenvolvidos anteriormente são pré-requisitos necessários para o funcionamento do Aqdados.

Durante os ensaios, foi utilizado também um indicador digital de pressões extremas, modelo PR-3920-TT da Transtec, já calibrado pelo fabricante. Trata-se de um equipamento muito simples que armazena os picos máximos e mínimos de pressão, possibilitando a verificação dos valores fornecidos pelo Aqdados.



Figura 4.13 – Tela de apresentação do Aqdados.

A figura 4.13 apresenta a primeira tela do programa Aqdados, onde se observa a barra de menu com diversas opções, onde deve ser escolhida a opção Ensaio e a seguir a opção Entradas Analógicas, que leva o programa para a tela apresentada na figura 4.14.

ъАЛ): Prir	ncipal: CAD12/32	<u>*</u>			
Γ	Ativo	Sinal	Unidade	F. Esc. Inf.	F. Esc. Sup.	Faixa Tipo
0		-	-	-5	5	-5.00 a 5.0 linear
1		PRESSÃO	mpa	-6,188395	6,374351	-2.50 a 2.5 linear
2		PRESSÃO	MCA	-60,2263	64,77	-2.50 a 2.5 linear
3		The second of the second difference is a second difference of the secon	MCA	-1,907349E-	6 106	-5.00 a 5.0 linear
4		PRESSÃO	MCA	0	62	-2.50 a 2.5 linear
5		PRESSÃO	MCA	-1,188609	253,94	-2.50 a 2.5 linear
6	\square	PRESSÃO	mca	-3	220	0 a 2.50 V linear
7				-5	5	- 5.00 a 5.0 linear
8				-5	5	- 5.00 a 5.0 linear
9		e V anna Alexen e andréa faith ann air e fhan anna 1993 ann an 1973 anna 1973 anna an 1973 anna 1973 anna 1973	 A to set of advancement of the constraint of the advancement of the constraint of the con	-5	5	- 5.00 a 5.0 linear
10	D	•		-5	5	- 5.00 a 5.0 linear
11		Automation (1999) Automatical Constraint (1999) Automatical C		-5	5	-5.00 a 5.0 linear
112	3			-5	5	-5.00 a 5.0 linear

Nessa tela pode-se observar os canais utilizados para cada transdutor e o canal zero (termo par) que armazena dados de temperatura ambiente. Além dessas informações pode-se verificar o fundo de escala superior e inferior e o intervalo de tensão.

Confirmando todos esses valores, deve-se voltar a opção Ensaio e a seguir a opção Executar, na qual será aberta a janela, mostrada na figura 4.15.

AqDados V5.04					
quivo <u>E</u> nsaio <u>C</u> onsulta	a <u>H</u> ardware	Ja <u>n</u> ela	Ajuda		
	a d				
Parâ	metros do Ens	saio			
Aquisição			OK I		
Frequência de Amostragem (Hz):	200,0				
		ا ا <u>ت محمد المحمد ال</u>	A <u>C</u> ancelar		
Arquivo de Dados			? <u>Aj</u> uda		
Arquivo Destino (.TEM):	Test134.TEM				
Duração:	0m0,000000				
Comentários:					
data 31/05/2001					
ensaio completo.					
		J			

Figura 4.15 - Parâmetros de Ensaio.

Nos Parâmetros de Ensaios é possível modificar a Freqüência de Amostragem e definir o nome do novo ensaio e a duração do mesmo. Depois de todas as modificações necessárias, devese clicar no botão OK o que autoriza a abertura da tela Ensaio dando início ao registro dos sinais registrados pelos transdutores.

A freqüência de amostragem utilizada nos ensaios, foi baseada no valor da celeridade e no período do sistema.

Durante a realização dos ensaios pode-se observar os valores de pressão no início e final do sistema, como ilustra a figura 4.16, para a seção à montante da válvula operada.

4



Figura 4.16 – Ensaio.

4.2.3 CÁLCULO DA VAZÃO

A vazão do sistema em regime permanente, foi calculada através da equação (4.49), utilizando um tanque acrílico colocado para coleta da vazão descarregada através da válvula solenóide. Trata-se de um tanque cúbico com as arestas iguais a 51 cm. A precisão do cronômetro utilizado para determinar o tempo é de centésimos de segundos.

$$Q = \frac{Vol}{t} \tag{4.49}$$

na qual:

Q = vazão em l/s.

Vol = volume de água medido em um tanque com dimensões conhecidas.

t = tempo em que o fluxo ficou desviado para o tanque.

Na primeira etapa dos ensaios foi obtida uma vazão igual a 0,41/s. Após a limitação da abertura de um registro na entrada do sistema, foi calculado novamente obtendo uma vazão igual a 0,27 l/s.

4.2.4 CÁLCULO DO FATOR DE ATRITO DO MODELO FÍSICO

Através dos transdutores instalados na saída do reservatório hidropneumático e na extremidade de montante da válvula solenóide, foi possível obter a perda de carga do sistema para o cálculo do fator de atrito válido para o regime permanente.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com o intuito de representar de forma mais adequada o comportamento natural do transiente em um sistema hidráulico, esse capítulo apresenta um estudo comparativo entre os modelos matemáticos e o experimental.

5.1 – ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS NO LABORATÓRIO.

As figuras 5.1 e 5.2, representam alguns dos ensaios realizados em uma primeira fase que com o fechamento brusco da válvula solenóide, desenvolveu a ocorrência de vaporização. Como os modelos matemáticos que foram investigados não contemplam esse fenômeno, foram necessárias a realização de novos ensaios com vazões inferiores a 0.4 l/s.

A figura 5.3 representa uma segunda fase de ensaios que através do controle da abertura de um registro localizado no início do sistema foi possível eliminar esse efeito, definindo o valor da vazão do sistema para 0.271/s.

A freqüência de amostragem utilizada nos ensaios foi de 200Hz.



Figura 5.1 – Resultados dos primeiros ensaios.



Figura 5.2 – Resultados dos primeiros ensaios.



Figura 5.3 – Segunda etapa de ensaios.

5.2 - APLICAÇÃO DO MODELO TRADICIONAL

A figura 5.4, representa um estudo preliminar com o modelo computacional que considera o fator de atrito do regime permanente (método tradicional), comparado com os resultados experimentais com o intuito de verificar o fenômeno transitório de um sistema hidráulico através desse método.

Os dados adotados nas simulações foram baseados nas características do modelo físico :

Vazão $\Rightarrow 0,27$ l/s; Comprimento da tubulação $\Rightarrow 252$ m; Celeridade $\Rightarrow 1008$ m/s; Fator de atrito $\Rightarrow 0,05$;



Figura 5.4 - Ensaio realizado entre os modelo matemático e o experimental.

Apesar do método tradicional representar o fenômeno transitório com valores acima dos ocorridos no modelo físico, ou seja, com uma margem de segurança, não possibilita uma representação eficiente da atenuação das ondas de pressão.

5.3 - APLICAÇÃO DO MODELO PROPOSTO POR VARDY.

Na figura 5.5 determina-se a aplicação do modelo proposto por Vardy et al (1993), no qual utiliza uma parcela referente ao atrito variável para aproximar os resultados experimentais aos obtidos através da modelação matemática.



Figura 5.5 - Ensaio realizado entre os modelos matemático e experimental.

Nessa análise nota-se a ineficiência do modelo proposto por Vardy et al (1993) para descrever o comportamento do modelo físico nos valores de pressão como no comportamento do fenômeno obtido nos ensaios do laboratório.

5.4 - APLICAÇÃO DO MODELO PROPOSTO POR BRUNONE.

Nessa simulação foi utilizado o modelo proposto por Brunone et al (1991), que considera o termo de atrito estático, durante o regime permanente, e uma outra parcela proporcional à aceleração do fluido, comparado com os resultados do modelo físico para avaliar a sua eficiência na representação do fenômeno transitório desenvolvido no experimento.



Figura 5.6 - Ensaio realizado entre os modelos matemático e experimental.

Na figura 5.6, pode-se observar que para as características desta instalação chegou-se a um valor de K igual 0.10, possibilitando uma maior aproximação entre o comportamento do modelo experimental e da modelação, tanto em valores de pressão como na atenuação das ondas de pressão.

5.5 - EXEMPLOS DE APLICAÇÃO DO MODELO PROPOSTO POR BRUNONE

Com o intuito de verificar a eficiência do modelo proposto por Brunone et al (1991), foi feito um exemplo como estudo de caso utilizando os ensaios realizados pelo Luvizotto (1997), em módulo experimental construído nos laboratórios da Unidade Docente de Mecânica dos Fluidos da Universidade Politécnica de Valência, Espanha (UPV).

A instalação consta de uma tubulação de cobre de aproximadamente 150 metros de comprimento com um diâmetro interno de 16 mm em formato de espiras com um 1 m de diâmetro.

Na sua extremidade de jusante está disposta uma válvula de 19 mm que produz o fechamento brusco para gerar o escoamento transitório. Na extremidade de montante existe um vaso de pressão, com pequenas dimensões, destinado a manter a carga constante em torno dos 50 mca.

Os valores de pressão foram obtidos através de um transdutor instalado próximo à válvula. O valor da celeridade obtido experimentalmente foi de igual a 1200 m/s.

Na figura 5.7 encontram-se os resultados da comparação do modelo proposto por Brunone, como modelo no qual foi considerado o fator de atrito válido somente para o regime permanente e os resultados experimentais. Através desse estudo pode-se observar que para as características desta instalação chegou-se a um valor de K = 0.15.

56



Figura 5.7 – Ensaio realizado entre os modelos matemático e experimental (Viaro et al, 2001).

As figuras 5.8 e 5.9 demonstram resultados obtidos na literatura em trabalhos publicados. O modelo experimental utilizado nesse estudo está instalado no laboratório de hidráulica da Universidade de Perúgia, composto por um reservatório, bombas, vaso de pressão, 352 metros de uma tubulação de polietileno com um diâmetro interno de 93.8 mm, concentrada numa estrutura circular com raio interno de 1,5m, e uma válvula esférica.

Através desse estudo pode-se observar que para as características desta instalação chegou-se a valores de K = 0.25 e K = 0.11 respectivamente.


Figura 5.8 - Comparação entre os modelos (Brunone et al, 2000b).



Figura 5.9 - Comparação entre os modelos (Brunone et al, 2000b).

As figuras 5.6, 5.7, 5.8 e 5.9 mostram ser impossível considerar um valor numérico para k, válido em todos os casos. Alguns trabalhos tentaram relacionar essa constante algum efeito.

Vardy e Brown (1996), desenvolveram uma nova expressão para o coeficiente da formulação original de Brunone (1991) afirmando ser influenciado pelo número de Reynolds.

$$K_3 = f_{ul} = 2\sqrt{C^*}$$

Onde C* é o coeficiente de decaimento que relaciona ao número de Reynolds, calculado a partir da equação:

$$C^* = \frac{7.41}{R^k}$$

onde o k é:

$$k = \log_{10} \left(\frac{14,3}{R^{0,05}} \right)$$

Utilizando uma estrutura experimental composto de um reservatório, bombas, vaso de pressão, 352 metros de uma tubulação de polietileno com um diâmetro interno de 93.8 mm, concentrada numa estrutura circular com raio interno de 1.5m, e uma válvula esférica, Brunone et al (2000b) desenvolve estudos sobre o cálculo do coeficiente k através da expressão.

$$\frac{y_n}{y_{n-1}} = \left(\frac{1}{1+K}\right)^2$$

No qual $y_n e y_{n-1}$ refere-se à diferença entre dois picos de pressão durante dois períodos consecutivos quaisquer.

Através dos valores experimentais demonstrados na figura 5.9, foi feita uma análise da equação citada acima, no qual foi encontrado um valor para a constante k igual a 0.07, diferente do estipulado pelo autor, demonstrado através da figura com a comparação dos modelos.

Utilizando os resultados experimentais do laboratório da Unicamp, foi feita uma análise destas formulações sobre o cálculo da constante k.

Aplicando a relação proposta por Vardy e Brown (1996), resultou em um valor para a constante K igual a 0.05, próximo ao valor estipulado, através de tentativa e erro, para as características da instalação estudada.

A relação proposta por Brunone, não resultou em um valor compatível ao encontrado através da comparação do modelo matemático, baseado na proposição de Brunone et al (1991), com os resultados obtidos no modelo experimental.

As figuras 5.10 e 5.11, evidenciam que um valor elevado de K "amortece" de maneira acentuada o fenômeno modelado desviando-o da realidade, mostrando a necessidade de se estabelecer um critério na determinação do K, devido a grande variação resultante em relação ao seu valor adotado.



Figura 5.10 - Ensaio realizado entre os modelos matemático e experimental (Viaro et al, 2001).



Figura 5.11 - Ensaio realizado entre os modelos matemático e experimental.

6. CONCLUSÕES

A relação entre a simplicidade da aproximação numérica e a exatidão de suas respostas evidencia os modelos computacionais mais adequados para a aplicação em empresas de abastecimento de água. Atualmente um modelo mais amplo tem como um dos objetivos a análise do comportamento transitório em sistemas hidráulicos a condutos forçados.

Durante muito tempo a modelação utilizada para a análise do transiente hidráulico foi simplificada, considerando o fator de atrito avaliado através de uma formulação válida para o regime permanente. Entretanto, nos últimos anos surgiram investigações para se conhecer o efeito da incorporação de uma formulação do termo de atrito variável em modelos de simulação para condições transitórias.

No desenvolvimento deste trabalho, através de uma análise comparativa da modelação computacional com situações reais foi possível observar que para a simulação de transientes hidráulicos torna-se necessário a inclusão do fator de atrito variável para o amortecimento das ondas de pressão originadas durante o fenômeno transitório.

Considerando os dois modelos propostos, pode-se observar que o desenvolvimento do equacionamento de Vardy et al (1993) é mais complexo e apesar das aproximações desenvolvidas e utilizadas no seu modelo não conseguiu modelar adequadamente os resultados do laboratório.

No caso de Brunone et al (1991), deve-se ressaltar a flexibilidade deste modelo para adaptar os resultados da modelação aos obtidos em sistemas hidráulicos através da constante K. Um valor elevado desta constante amortece rapidamente o fenômeno modelado perdendo totalmente a sensibilidade na representação das condições reais de uma rede.

Com o intuito de estabelecer um critério na determinação do K, devido a grande variação resultante em relação ao seu valor adotado, foram estudadas algumas expressões encontradas na literatura. Os valores obtidos através destas tentativas não foram significativos para que fossem consideradas como uma lei válida para todos os casos.

Sugere-se um estudo do modelo proposto por Brunone et. al (1991), no qual pode-se considerar apenas a parcela do atrito permanente durante o desenvolvimento da derivada total e acrescentar em uma segunda etapa a parcela do atrito variável, possibilitando através dessa tentativa, simplificar a modelação evitando as interpolações na reta característica positiva.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, J.G. P., (1994), Análise e otimização da operação de usinas hidrelétricas, Tese de Livre Docência – UNICAMP, Campinas, Brasil.

BRUNONE, B., GOLIA, U.M., (1991), Modelling of fast Transients by Numerical Methods, 9th and last Round Table of the IAHR Group on Hydraulic Transients with Water Column Separation - Universidad Politecnica de Valencia Spain Setembro, pp. 273-282.

BRUNONE, B., e KARNEY, B.W., (2000a), Actual unsteady velocity profiles in pressurized pipes and the steady- state approach, 8th International Conference on Safe Design and Operation of Industrial Pipe-Systems, BHR Group Pressure Surges, April, pp.519-528, Netherlands.

BRUNONE, B., e KARNEY, B.W., (2000b), Velocity profiles and unsteady pipe friction in Transient flow, Journal of Water Researches Planning and Management, ASCE, V.126, n.4, July, pp.236-244.

BRUNONE, B., e MORELLI, L., (1999), Automatic control valve-induced transients in operative pipe system, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, V. 125(5), May, pp.534-542.

BUGHAZEM, M.B.; ANDERSON, A., (1996), Problems with Simple Models for Damping in Unsteady Flow, 7th International Conference on Pressure Surges and Fluid Transients in Pipelines and Open Channels, BHR Group, 16-18 Abril, pp. 537-548.

EICHINGER, P.; LEIN, G., (1992), The influence of friction on unsteady pipe flow, Inetrnational Conference on Unsteady Flow and Fluid Transients, 29 Setembro a 1 Outubro, pp. 41-52, Durham – U.K.,

FUNK, J.E. e WOOD, D.J., (1974), Frequency response of fluid lines with turbulent flow, Journal of Fluids Engineering, ASME, December, pp. 365-369.

HOLMBOE, E.L. e ROULEAU, W.T., (1967), The effect of viscous shear on transients in liquid lines, Journal of the Hydraulics Division, ASCE, V.118, N.7, July.

LUVIZOTTO JR., E., (1995), Controle operacional de redes de abastecimento de água auxiliado por computador, **Tese apresentada a EPUSP para obtenção do título de Doutor**, São Paulo, Campinas, junho.

LUVIZOTTO JR., E., (1997), Modelos Matemáticos para a detecção de fugas, **Relatório Parcial** 2 – Fapesp, Setembro.

MCINNIS, D., e KARNEY, B.W., (1995), transients in distribuction networks: Field tests and demand models, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, V. 121(3), March, pp.218-231.

POLL, H.G., (1999), Válvula de controle acoplado a redes hidráulicas, Tese de Doutorado apresentada à Escola Politécnica da USP, São Paulo, Brasil.

ROCHA, M. S., (1998), Influência do fator de atrito no cálculo do transiente hidráulico, **Dissertação de Mestrado apresentado à UNICAMP**, Campinas, Brasil.

ROCHA, M. S., ANDRADE, J.G.P., LUVIZOTTO, E. JR., (1999), El factor de friccion em el transient caudal, IV Congresso de Métodos Numéricos em Ingenieria a celebrase em Sevilla, Junio.

SHARP, B.B., (1998), Waterhammer – do we have simple rules ?, XIX IAHR Symposium Hydraulic Machinery and Cavitation V.2, pp.686-693, Singapore.

STEWARDSON, D., BRUNONE, B., e FERRANTE, M., (2000), Using experimental design to determine transient pressure behavior, 8th International Conference on Safe Design and Operation of Industrial Pipe-Systems, BHR Group Pressure Surges, April, pp.611-622, Netherlands.

TRIKHA, A.K.,(1975), An efficient method of simulating frequency-dependent friction in transient liquid flow, **Journal of Fluids Engineering**, Transaction of ASME, V.97, pp.97-105.

VARDY, A., e HWANG, K. L., (1991), A characterístics model of transient friction pipes, Journal of Hydraulic Researches, V.29, N.5., pp.660-683.

VARDY, A., et al., (1993), A weighting function model of tut pipe friction, Journal of Hydraulic Researches, V.31, N.4, pp.533-548.

VARDY, A., BROWN, J., (1996), On turbulent, unsteady, smooth-pipe friction, 7th International Conference on Pressure Surges and Fluid Transients in Pipelines and Open Channels, BHR Group, 16-18 Abril, pp. 289-305.

VIARO, V. L., ANDRADE, J.G. P., LUVIZOTTO JR., E., (2001) Influência do fator de atrito variável na avaliação do escoamento transitório em sistemas hidráulicos, **XX1 Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental,** ABES, Setembro.

VITKOVSKY, J., LAMBERT, M., SIMPSON, A., (2000), Advances in unsteady friction modeling in transient pipe flow, 8th International Conference on Safe Design and Operation of Industrial Pipe-Systems, BHR Group Pressure Surges, April, pp.471-482, Netherlands.

WALSKI, T.M., e LUTES, T.L., (1994), Hydraulic transients cause low-pressure problems, Americam Water Works Associatión, V.86, N.12, December, pp. 24-32.

ZIELKE, W., (1968), Frequency-dependent friction in transient pipe flow, Journal of Basic Engineering ,ASME, V.90, pp.109-115.

.

ABSTRACT

VIARO, Vivien Luciane. It influences of the factor of variable attrition in the evaluation of the Transitory flowing in waterworks. Campinas: 2001. 86 Págs. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas.

Hydraulic transient is defined as the transition between two permanent flowing conditions. In this transition, the greatness variation related to the flowing, mainly the pressure, is important to the measuring and exploration of hydraulic installation. Studies about transitory situations and the shuntings that caused them are fundamental to guarantee operational safety of the hydraulic plants in general. The transitory flowing analysis in forced conduits is based on equations of continuity and on the amount of movement. One of the imprecisions related to the conventional modeling is in using a almost-static formulation for the friction term, which is only valid for permanent flowing. This paper compares the results obtained from physical model with the one from the mathematical modeling, considering or not a special modeling for transitory friction term. The models used proposed by Brunone et. al. (1991) and Vardy et. al. (1993), to describe the variable friction term.

Keywords: Hydraulic Transientes, variable friction term, method of the characteristics

```
interface
uses
  Windows, Messages, SysUtils, Classes, Graphics, Controls,
Forms, Dialogs,
  StdCtrls,U_PLOT, ExtCtrls;
type
  TForm1 = class(TForm)
    Button1: TButton;
    PaintBox1: TPaintBox;
    Label1: TLabel;
    Edit1: TEdit;
    Label2: TLabel;
    procedure FormCreate(Sender: TObject);
    procedure Button1Click(Sender: TObject);
  private
    { Private declarations }
  public
    { Public declarations }
  end;
mat = array [1..1000] of real; {Define vetor tipico}
var
 Form1: TForm1;
L,D : real; {comprimento e diametro da tubulação}
```

unit Brunone;

: real; {fator de atrito} : real; {celeridade} f : real; а : real; {nivel do reservatorio} . real; {vazão inicial}
: real; {const-HR 00 {constante de Brunone} K3 : Integer; {Numero de divisões da tubulação} Ν {vetor de vazao e carga no instante atual} Q, H, {vetor de vazao e carga no instante futuro} QP,HP : mat; {incremento e valor da variável tempo} DT, T : real; : real; {tempo de controle de cálculo} TC : TextFile; Arq procedure Calcula por Brunone; implementation var {constante baseada na constante K3 de BRUNONE} KB : real; {constante de inpedancia} : real; B : real; {constante de resistemcoa} R {incremento de espaco} : real; DX {constante de impedancia modificado por : real; BK Brunone } CA,CB, {variáveis do processo de cálculo} BA, BB : real; OA, HA : real; {valores de vazao e carga interpolados} DGraf : TGraf; Const PI = 3.14159;q = 9.8;{-----<01>-Inicializa variaveis para o inicio do calculo-----} procedure Inicial; Var AR : real; {area da tubulação} j : integer; {contador} begin DX := L/N; AR := PI*D*D/4;R := f*DX/(2*G*D*AR*AR); $B := a/(q^*AR);$ BK := B*(1+K3);KB := K3/(1+K3);

```
for j := 1 to (N+1) do
   begin
     H[j] := HR-R^{*}(j-1)^{*}Qo^{*}Qo;
      Q[j] := Qo;
    end;
DT := DX/a;
end;
{-----<02> - Rotina de calculo dos pontos interiores-----}
procedure pontos interiores;
var
          : integer; {Contadores internos}
j
begin
for j :=2 to N do
 begin
   QA := Q[j-1] + KB*(Q[j]-Q[j-1]);
   HA := H[j-1] + KB*(H[j]-H[j-1]);
   CA := HA+B*QA;
   BA := B+R*abs(QA);
   CB := H[j+1] - BK * Q[j+1];
   BB := BK+R*abs(Q[j+1]);
   QP[j] := (CA-CB) / (BA+BB);
   HP[j] := CA-BA*QP[j];
 end;
end;
{-----<03> - Contorno Reservatorio de montante ------}
procedure Reservatorio;
begin
   CB := H[2] - BK * Q[2];
   BB := BK+R*abs(Q[2]);
   HP[1] := HR;
   QP[1] := (HP[1]-CB)/BB;
end;
{-----<04> - Contorno valvula de jusante ------}
procedure valvula;
begin
   QA := Q[N] + KB*(Q[N+1]-Q[N]);
   HA := H[N] + KB*(H[N+1]-H[N]);
   CA := HA + B * QA;
   BA := B + R * abs(QA);
```

```
QP[N+1] := 0;
  HP[N+1] := CA-BA*QP[N+1];
end;
{-----<05> - Atualização de cargas e vazões ------}
procedure atualiza;
var
j : integer; {contador para as seções}
begin
 for j := 1 to (N+1) do
    begin
     H[j] := HP[j];
      Q[j] := QP[j];
    end;
end;
{-----<05> - Apresenta resultados nas seções de calculo -----}
procedure Resultados;
begin
   writeln(arg, T:6:2,
H[1]:10:2,Q[1]:10:2,H[N+1]:10:2,Q[N+1]:10:2);
   end;
procedure Calcula por Brunone;
var
j : integer;
begin
j:=-1;
AssignFile(Arq, 'Teste.dat');
rewrite(Arq);
Inicial;
T := 0;
Resultados;
repeat
j:=j+1;
DGraf.Mplot[1,j]:=T; Dgraf.Mplot[2,j]:=H[N+1];
T := T+DT;
pontos Interiores;
Reservatorio;
valvula;
Atualiza;
Resultados;
until T>TC;
```

```
CloseFile (Arq);
DGraf.Npontos := j;
end;
procedure TForm1.FormCreate(Sender: TObject);
begin
DGraf.TGRF :=PaintBox1;
L := 252;
f := 0.10;
D := 0.020;
a := 1008;
Hr :=53;
Qo := 0.00027;
K3 := 0.0;
N := 10;
TC := 9.00;
DGraf.Titx := 'Tempo';
DGraf.Tity := 'Carga';
end:
function Lab : integer;
var
Fle : TextFile;
i : integer;
begin
  i :=1;
  assignFile(Fle, 'a:\lab191.txt');
  reset(fle);
  repeat
  read(fle,Dgraf.Mplot[1,i],Dgraf.Mplot[2,i]);
  i := i+1;
  until eof(fle);
  closeFile(fle);
  lab := i;
end;
procedure TForm1.Button1Click(Sender: TObject);
var
code : integer;
begin
k3:=0;
Padroes(DGraf);
Calcula por Brunone;
Grafico(DGraf);
val (Edit1.text,K3,code);
Calcula por Brunone;
```

```
Dgraf.PLcor := clred;
traca(DGraf);
DGraf.Npontos :=(lab)-2;
Dgraf.PLcor := clblack;
traca(DGraf);
end;
begin
{$R *.DFM}
```

end.

unit Permanente;

interface

```
uses
  Windows, Messages, SysUtils, Classes, Graphics, Controls,
Forms, Dialogs,
  StdCtrls, U PLOT, ExtCtrls;
type
  TForm1 = class(TForm)
    Button1: TButton;
    PaintBox1: TPaintBox;
    Label2: TLabel;
    procedure FormCreate(Sender: TObject);
    procedure Button1Click(Sender: TObject);
  private
    { Private declarations }
  public
    { Public declarations }
  end;
mat = array [1..1000] of real;
var
 Form1: TForm1;
L, D, f, a, HR, Qo, B, R, DX, CA, CB, BA, BB,
DT, T, TF: real;
N,NS: Integer;
Q,H,QP,HP: mat;
Arq: TextFile;
procedure Calcula;
implementation
```

```
var
DGraf : TGraf;
const
 PI = 3.14159;
 q = 9.81;
procedure preliminares;
Var
S : real;
j : integer;
begin
DX := L/N;
S := PI*D*D/4;
R := f*DX/(2*G*D*S*S);
B := a/(g*S);
NS:=N+1;
 for j := 1 to (N+1) do
    begin
      H[j] := HR-R*(j-1)*Qo*Qo;
      Q[j] := Qo;
    end;
    DT := DX/a;
    end;
procedure pontosinteriores;
var
j
          : integer;
begin
for j :=2 to N do
 begin
   CA := H[J-1] + B * Q[J-1];
   CB := H[J+1] - B*Q[J+1];
   BA := B+R*abs(Q[J-1]);
   CB := H[j+1] - B*Q[j+1];
   BB := B + R * abs(Q[J+1]);
   QP[j] := (CA-CB)/(BA+BB);
   HP[j] := CA-BA*QP[j];
 end;
end;
```

```
procedure Reservatorio;
begin
   HP[1] := HR;
   CB := H[2] - B \times Q[2];
   BB := B+R*abs(Q[2]);
   QP[1] := (HP[1]-CB)/BB;
end;
procedure valvula;
begin
   CA := H[N] + B*(Q[N]);
   BA := B + R * abs(Q[N]);
   QP[NS] := 0;
   HP[NS] := CA-BA*(QP[NS]);
end;
procedure atualiza;
var
j : integer;
begin
 for j :=1 to NS do
    begin
      H[j] := HP[j];
      Q[j] := QP[j];
    end;
end;
procedure Resultados;
begin
   writeln(arq, T:6:2,
H[1]:10:2,Q[1]:10:2,H[N+1]:10:2,Q[N+1]:10:2);
   end;
procedure Calcula;
var
j : integer;
begin
j:=-1;
AssignFile(Arq, 'Teste.dat');
rewrite (Arq);
```

```
preliminares;
T := 0;
Resultados;
repeat
j:=j+1;
DGraf.Mplot[1,j]:=T; Dgraf.Mplot[2,j]:=H[N+1];
T := T+DT;
pontosInteriores;
Reservatorio;
valvula;
Atualiza;
Resultados;
until T>TF;
CloseFile (Arq);
DGraf.Npontos :=j;
end;
procedure TForm1.FormCreate(Sender: TObject);
begin
DGraf.TGRF :=PaintBox1;
L := 252;
f := 0.10;
D := 0.020;
a := 1008;
Hr :=53;
Qo := 0.00027;
N := 10;
TF :=8.9;
DGraf.Titx := 'Tempo';
DGraf.Tity := 'Carga';
end;
function Lab : integer;
var
Fle : TextFile;
i : integer;
begin
  i :=1;
  assignFile(Fle, 'a:\LAB191.txt');
  reset(fle);
  repeat
  read(fle,Dgraf.Mplot[1,i],Dgraf.Mplot[2,i]);
  i := i+1;
  until eof(fle);
  closeFile(fle);
  lab := i;
```

```
end;
procedure TForm1.Button1Click(Sender: TObject);
begin
Padroes(DGraf);
Calcula;
Grafico(DGraf);
Calcula;
DGraf.Npontos :=(lab)-2;
Dgraf.PLcor := clblack;
traca(DGraf);
end;
begin
{$R *.DFM}
end.
```

```
unit VARDYgr;
```

```
interface
uses
  Windows, Messages, SysUtils, Classes, Graphics, Controls,
Forms, Dialogs,
  StdCtrls, U PLOT, ExtCtrls;
type
  TForm1 = class(TForm)
    Button1: TButton;
    PaintBox1: TPaintBox;
    Label2: TLabel;
    procedure FormCreate(Sender: TObject);
    procedure ButtonlClick(Sender: TObject);
  private
    { Private declarations }
  public
    { Public declarations }
  end;
matrix = array [1..1000] of real;
vet=array[1..1000] of real;
var
  Form1: TForm1;
```

```
h0,q0,dt,be,qe,qd,bd,cv,tem,t,d,l,hr,cda,a,p,cd,ce,r0,c,ca,cb,dx,
s,b,qec,qdc,qpc,td,te,pe,pc,ba,bb,tau,cc,ccl,tt,dif,
  tp,hd,psi,cf:real;
  r,h,hp,ylt,y2t,y1,y2,qt,q,qp,qi,dq,sub:vet;
  x:matrix;
  i, j, ns, n: integer;
  args, arquivo:text;
procedure Calcula;
implementation
var
DGraf : TGraf;
const
 PI = 3.14159;
 q = 9.8;
 v0=0.86;
 ni=0.000087;
 ro=1000;
 tc=10;
 tf=0.03;
 f0=0.105;
 a1=365;
 a2=35;
 b1=120000;
 b2=5000;
 tol=0.0001;
 e=0.02;
procedure preliminares;
begin
DX := L/N;
S := PI*D*D/4;
R0:= f0*DX/(2*G*D*S*S);
B := a/(g*S);
ns:=n+1;
 for i :=1 to NS do
    begin
       h[i]:=hr-r0*(i-1)*sqr(q0);
       Q[i] := q0;
       qt[i]:=q0;
```

```
qi[i]:=q0;
      y1[i]:=0;
      v2[i]:=0;
    end;
DT := DX/a;
psi:=(4*ni*dt)/sqr(d);
end;
procedure pontosinteriores;
begin
for i :=2 to N do
 begin
                ylt[i]:=y1[i]*exp(-b1*psi)+(a1/s)*(qt[i]-q[i]);
                y2t[i]:=y2[i]*exp(-b2*psi)+(a2/s)*(qt[i]-q[i]);
                cf:=((16*ni)/(q*d*d)*(y1t[i]+y2t[i]))*dx;
                ca:=h[i-1]+b*q[i-1]-cf;
                cb:=h[i+1]-b*q[i+1]-cf;
                ba:=b+r0*abs(g[i-1]);
                bb:=b+r0*abs(g[i+1]);
                qp[i]:=(ca-cb)/(ba+bb);
                hp[i]:=ca-ba*qp[i];
                y1[i]:=y1t[i];
                y2[i]:=y2t[i];
                qi[i]:=qt[i];
end;
end;
procedure Reservatorio;
begin
                ylt[1]:=y1[i]*exp(-b1*psi)+(a1/s)*(qt[i]-q[i]);
                y2t[1]:=y2[i]*exp(-b2*psi)+(a2/s)*(qt[i]-q[i]);
                cf:=((16*ni)/(g*d*d)*(y1t[i]+y2t[i]))*dx;
                hp[1]:=hr;
                cb:=h[2]-b*q[2]-cf;
                bb:=b+r[1]*abs(q[2]);
                qp[1]:=(hp[1]-cb)/bb;
                y1[1]:=y1t[i];
                y2[1]:=y2t[i];
                qi[1]:=qt[i];
```

end;

```
procedure valvula;
```

```
begin
                ylt[ns]:=y1[i]*exp(-b1*psi)+(a1/s)*(qt[i]-q[i]);
                y2t[ns]:=y2[i]*exp(-b2*psi)+(a2/s)*(qt[i]-q[i]);
                cf:=((16*ni)/(g*d*d)*(y1t[i]+y2t[i])*dx);
                ca:=h[n]+b*q[n]-cf;
                ba:=b+r0*abs(q[n]);
                qp[ns]:=0;
                hp[ns]:=ca-ba*qp[ns];
                yl[ns]:=ylt[i];
                y2[ns]:=y2t[i];
                qi[ns]:=qt[i];
          end;
procedure atualiza;
var
i: integer;
begin
 for i :=1 to Ns do
    begin
      H[i] := HP[i];
      Q[i] := QP[i];
    end;
end;
procedure Resultados;
begin
   writeln(arquivo, Tem:6:2,
H[1]:10:2,Q[1]:10:2,H[Ns]:10:2,Q[Ns]:10:2);
   end;
procedure Calcula;
var
i : integer;
begin
i:=-1;
AssignFile(Arquivo, 'Teste.dat');
rewrite(Arquivo);
preliminares;
Tem := 0;
Resultados;
repeat
```

```
i:=i+1;
DGraf.Mplot[1,i]:=Tem; Dgraf.Mplot[2,i]:=H[N+1];
Tem := Tem +DT;
pontosInteriores;
Reservatorio;
valvula;
Atualiza;
Resultados;
until Tem>Tc;
CloseFile(Arquivo);
DGraf.Npontos :=i;
end;
procedure TForm1.FormCreate(Sender: TObject);
begin
DGraf.TGRF :=PaintBox1;
L := 252;
{f0 := 0.015;}
D := 0.020;
a := 1000;
Hr :=52;
q0 :=0.0003;
N := 10;
DGraf.Titx := 'Tempo';
DGraf.Tity := 'Carga';
end;
function Lab : integer;
var
Fle : TextFile;
j : integer;
begin
  j :=1;
  assignFile(Fle, 'a:\lab191.txt');
  reset(fle);
  repeat
  read(fle,Dgraf.Mplot[1,j],Dgraf.Mplot[2,j]);
  j := j+1;
  until eof(fle);
  closeFile(fle);
  lab := j;
end;
procedure TForm1.Button1Click(Sender: TObject);
begin
```

```
Padroes(DGraf);
Calcula;
Grafico(DGraf);
Calcula;
DGraf.Npontos :=(lab)-2;
Dgraf.PLcor := clblack;
traca(DGraf);
```

end;

begin

{\$R *.DFM} end.