



MODELOS DE SIMULAÇÃO PARA TRANSIENTES HIDRÁULICOS

Gustavo Nascimento Lins¹ ; Alexandre Kepler Soares²

RESUMO – Os transientes hidráulicos são fenômenos causados por variações no escoamento permanente. Essas variações causam flutuações de vazão e pressão, que são capazes de ocasionar rupturas na tubulação a depender da magnitude. Tais consequências demonstram a importância de compreender profundamente esse fenômeno. As equações que o descrevem são de difícil resolução analítica, por isso, é necessário o uso de métodos numéricos para resolvê-las. Desse modo, o presente trabalho faz uma revisão de alguns dos métodos utilizados, suas aplicações e encerra com um exemplo de simulação em um sistema reservatório-tubo-válvula utilizando o Método das Características

ABSTRACT– Hydraulic transients are phenomena caused by variations in steady flow. These variations cause flow and pressure fluctuations, capable of causing pipe ruptures, depending on the magnitude. Such consequences demonstrate the importance of understanding this phenomenon more deeply. The equations that describe it are difficult to solve analytically, requiring the use of numerical methods to solve them. The present work reviews some of the methods used, their applications and ends with an example of a simulation in a reservoir-tube-valve system using the Method of Characteristics.

Palavras-Chave – Transientes Hidráulicos, Método das características, Golpe de Aríete

INTRODUÇÃO

Os transientes hidráulicos são fenômenos que ocorrem na mudança entre dois escoamentos de regime permanente. Apesar de ser um fenômeno comum, a maioria dos sistemas hidráulicos é dimensionada sem levá-lo em consideração, o que gera um risco à estabilidade e segurança do sistema, tendo em vista que essas variações causam flutuações de vazão e pressão que, a depender da magnitude, podem ocasionar ruptura das tubulações, causando a interrupção do funcionamento do sistema, além de possíveis contaminações externas.

Uma das formas mais utilizadas para a análise desses eventos é o uso de modelos para a simulação de transientes hidráulicos. Essa prática consiste em utilizar modelos numéricos, baseados nos conceitos físicos e desenvolvidos para reproduzir da melhor forma possível o comportamento do fluxo da água no interior das tubulações (Salvino, 2012).

1) Engenheiro Ambiental pela Universidade de Brasília (UnB). Mestrando no Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos da Universidade de Brasília (PTARH/UnB).

2) Engenheiro Civil pela Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS). Mestre e Doutor em Engenharia Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP). Pós-Doutor no Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa, Portugal. Professor associado no Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos da Universidade de Brasília (PTARH/UnB).



Geralmente, esses modelos se baseiam nas equações da continuidade e da quantidade de movimento, que são um conjunto de equações diferenciais parciais hiperbólicas de difícil resolução analítica. Os modelos se diferenciam na forma de resolvê-las e, geralmente, são comparados em termos da eficiência computacional e a acurácia dos resultados obtidos.

O objetivo do presente artigo é apresentar uma revisão da literatura dos diferentes modelos utilizados para simulação de transientes hidráulicos e suas aplicações.

EQUAÇÕES GOVERNANTES

Os transientes hidráulicos em condutos fechados podem ser descritos matematicamente pelas equações de continuidade e de quantidade de movimento. Elas podem ser descritas de forma simplificada nas Equações (1) e (2).

$$a^2 \frac{\partial Q}{\partial x} + gA \frac{\partial H}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

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

Onde Q é a vazão, g é a aceleração da gravidade, t é o tempo, x a posição na tubulação, A é a área transversal do tubo, a é a velocidade de propagação da onda e $f(Q)$ representa a resistência da tubulação que é função da vazão (Chaudhry, 2014; Wood *et al*, 2005).

Assim, para uma rede de tubulações, a solução de um transiente hidráulico é obtida resolvendo as Equações (1) e (2), com as condições iniciais e de contorno adequadas. Entretanto, exceto por aplicações simples ou simplificações extremas das condições de contorno ou do termo de resistência da tubulação, não é possível obter uma solução direta.

Dito isso, quando outros componentes são considerados, a solução dessas equações se torna bastante complicada, e torna-se necessário o uso de técnicas numéricas para se encontrar soluções aproximadas (Wood *et al*, 2005).

MÉTODOS NUMÉRICOS PARA SOLUÇÃO DAS EQUAÇÕES GOVERNANTES

Método das Características

O Método das Características (MOC) se baseia na transformação das Equações (1) e (2), que são equações diferenciais parciais, em equações diferenciais ordinárias (Eqs. 3 e 4) que são válidas para $dy/dx = a$ e $dy/dx = -a$, respectivamente.

$$\frac{dQ}{dt} + \frac{gA}{a} \frac{dH}{dt} + RQ |Q| = 0 \quad (3)$$

$$\frac{dQ}{dt} - \frac{gA}{a} \frac{dH}{dt} + RQ |Q| = 0 \quad (4)$$

O custo dessa simplificação é que as equações 1 e 2 são válidas em todo o domínio do plano x - t e as Equações 3 e 4 são válidas apenas nas retas características (caso a seja constante), representadas nas Figura 1.

O ponto P é onde se deseja obter as informações, os pontos A e B são os pontos a montante e a jusante, respectivamente, no instante anterior (Chaudhry, 2014). Quando esse esquema é feito para toda a tubulação, chega-se na malha característica.

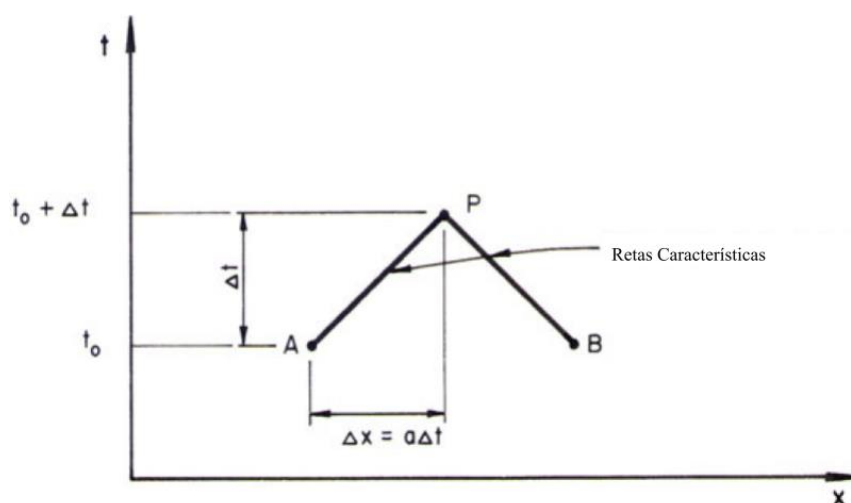


Figura 1 – Retas Características no plano x - t (adaptado de Chaudhry, 2014)

Soares *et al* (2013) aplicaram o MOC e coleta de dados em campo para a análise de transiente no caso da interrupção abrupta de um sistema de bombeamento. O esquema simplificado do sistema está representado na Figura 2.

Para a modelagem com o método das características, foram considerados dois cenários: (i) reservatório de nível constante como condição de contorno de jusante, fator de atrito como constante (modelo elástico clássico) e variável para cálculo das perdas de carga e; (ii) três reservatórios com nível variável como condição de contorno de jusante e considerando fator de atrito variável (sistema real). Os dados coletados foram utilizados para calibrar e verificar o modelo.

Os resultados obtidos demonstraram que o modelo elástico clássico (com o fator de atrito constante) foi impreciso para descrever o comportamento do sistema e assumir a condição de contorno de jusante como o reservatório de nível fixo não foi satisfatório. Apesar dessa premissa ser favorável no quesito segurança, por superestimar as sobrepressões no sistema, ela demonstra falta de acurácia para análise de sistemas já estabelecidos.

A modelagem do alívio nas altas pressões (cenário ii) demonstrou ser um ponto chave para a melhoria dos resultados numéricos do modelo, que podem ser observados na Figura 3.

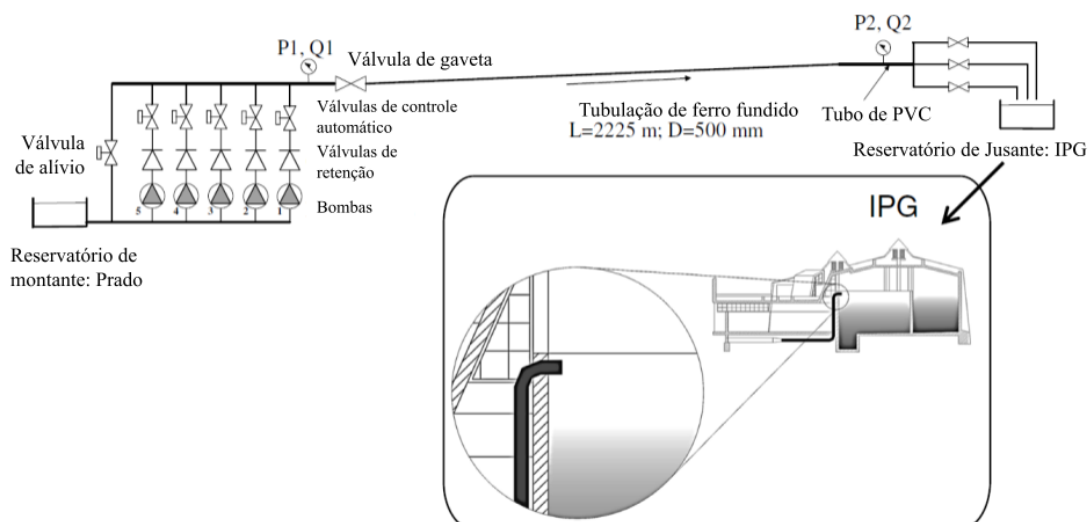


Figura 2 – Esquema simplificado do sistema de abastecimento de Guarda, Portugal (Adaptado de Soares *et al.*, 2013)

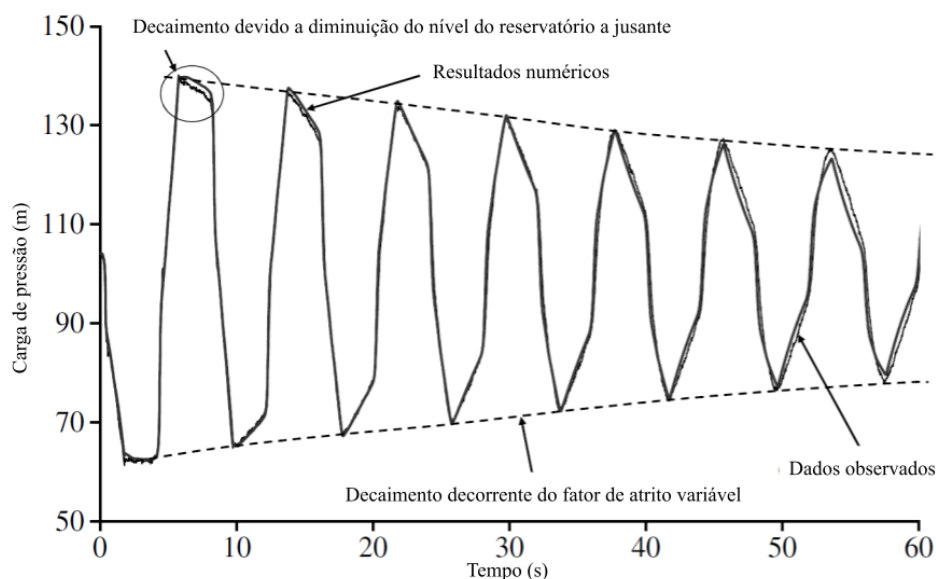


Figura 3 – Cargas de pressão observadas em P1 e resultados numéricos do modelo elástico (Adaptado de SOARES *et al.*, 2013)

Método das Ondas Características

O método das ondas características (WCM) é um método lagrangeano que se baseia no conceito de que os transientes resultam da geração e propagação de ondas causadas por uma alteração no sistema (fechamento de válvula, desligamento de bombas, ...).

A Figura 4 apresenta como a onda de pressão se desloca em velocidade sônica no meio líquido, e é parcialmente transmitida e refletida para todas as descontinuidades no sistema de tubulações (Wood *et al.*, 2005).

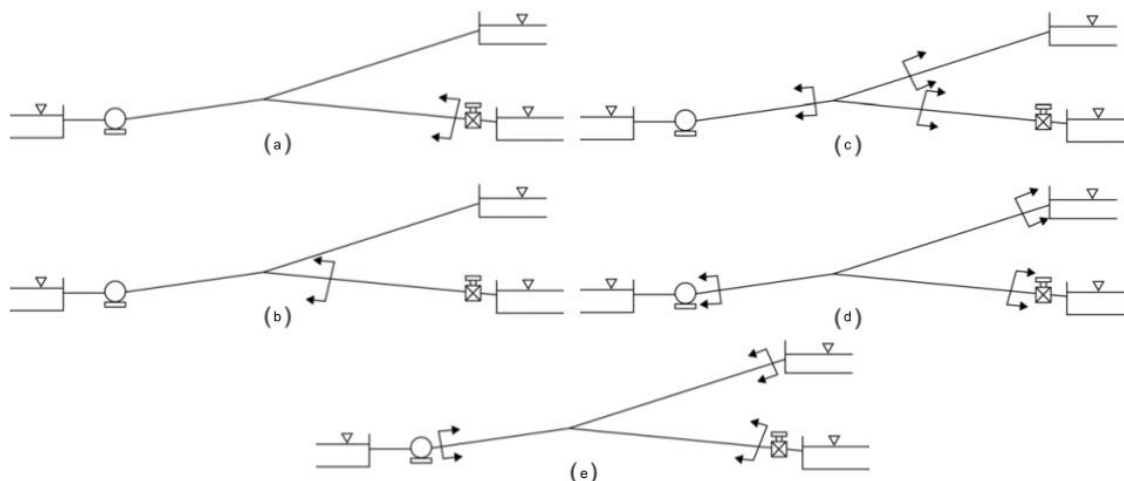


Figura 4 – Ondas geradas devido ao fechamento de válvula (adaptado de Wood *et al.*, 2005)

Jung *et al.*(2009) usaram o WCM para simulação de transientes hidráulicos com cavitação causados pelo fechamento de uma válvula e compararam os resultados com o MOC. Foram simulados dois cenários: (i) um sistema formado por um reservatório, 5 tubulações em série e uma válvula e; (ii) um sistema reservatório-rede-válvula. Em ambos os cenários a válvula fecha em 1s.

As simulações foram feitas em pares, uma sem levar em consideração a cavitação e a outra levando-a em consideração. No primeiro cenário, a pressão máxima obtida levando em consideração a cavitação ficou 76% maior do que quando não foi considerada.

Após essa análise, Jung *et al.*(2009) sugerem algumas formas de prevenir a cavitação, sendo elas: (i) mudar a velocidade de operação do sistema, pois quanto maior for o tempo de fechamento, menor será a diferença de pressão entre a pressão no escoamento permanente e as máximas ou mínimas causadas pelo transiente; (ii) alterar as características do sistema, de modo que uma tubulação maior, diminui a velocidade da onda de pressão, assim como materiais mais flexíveis também. E, por último, (iii) usar dispositivos de segurança, como ventosas, podem reduzir até 26m da pressão máxima.

O segundo cenário foi simulado com e sem cavitação. A fim de comparação, ambos também foram calculados com o MOC, e os resultados foram satisfatoriamente semelhantes, como é possível observar na Figura 5.

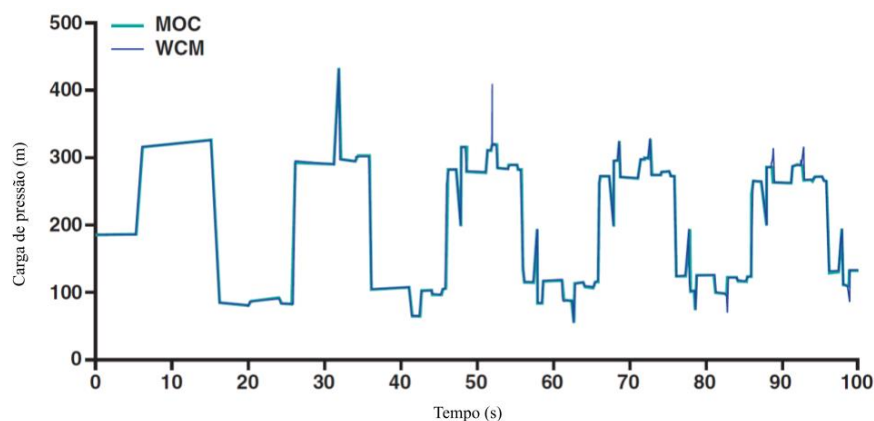


Figura 5 – Carga de pressão na válvula do cenário reservatório-tubulações-válvula, considerando-se a cavitação (adaptado de Jung et al.,2009)

Método dos Volumes Finitos

As equações diferenciais podem ser aproximadas pelo método dos volumes finitos (MVF) de duas maneiras: (i) pela realização de balanços da propriedade em questão dos volumes finitos; e (ii) partindo-se da equação diferencial da forma conservativa, integrá-la sobre o volume, no espaço e no tempo. Ambos os processos são equivalentes, pois, para deduzir as equações diferenciais é necessário primeiro realizar um balanço em um volume infinitesimal. (Maliska, 2004)

Pal *et al.* (2020), utilizaram o MVF, baseado nos esquemas de Godunov de primeira e segunda ordem, para a simulação de transiente hidráulico causado pelo fechamento de uma válvula em um sistema reservatório-tubo-válvula (Figura 6) e compararam os valores com os obtidos com o MOC e com dados experimentais.

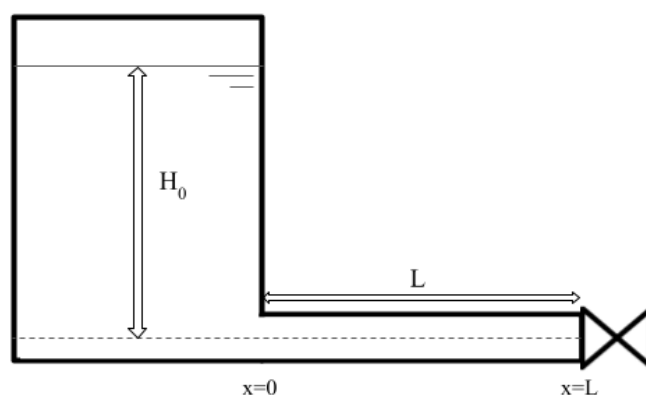


Figura 6 – Representação de um sistema reservatório-tubo-válvula

Os resultados demonstraram semelhança entre o MVF e o MOC quando o número de Courant (Cr) é igual à unidade, sendo uma vantagem do MVF ter pouca variação dos resultados para valores



mais baixos de Cr, quando, por exemplo, a velocidade da onda varia devido a mudança na espessura da tubulação ou pela presença de cavitação.

Os resultados do modelo também foram comparados com diversos dados disponibilizados na literatura, obtidos de forma experimental. De forma geral o modelo do MVF descreveu os picos do transiente hidráulico de forma satisfatória, tendo apenas pequenos deslocamentos em relação ao tempo, devido a representação ideal de fechamento imediato ($\Delta t = 0$) ou erros de medição em função do tempo, no caso de fechamento lento.

Além disso, o método de Vardy e Brown (2007) de resistência não-permanente foi efetivamente implementado no modelo, apresentando bons resultados ao compara-se com a literatura.

APLICAÇÃO DO MÉTODO DAS CARACTERÍSTICAS

Para o presente artigo, foi construída uma rotina computacional em *Python* para simular, por meio do método das características, um transiente hidráulico causado pelo fechamento de uma válvula em um sistema reservatório-tubo-válvula (Figura 6).

A tubulação foi considerada como assentada na horizontal na cota zero, o fator de atrito foi considerado o mesmo para os escoamentos permanente e transitório. Os valores dos parâmetros utilizados para a simulação estão apresentados na Tabela 1 e a variação de carga no escoamento permanente na Figura 7.

Tabela 1 – Características do sistema simulado

Parâmetro	Diâmetro (D)	Comprimento da tubulação (L)	Fator de atrito (f)	Velocidade média	Velocidade de propagação da onda (a)	Altura do nível d'água do reservatório
Valor	1 m	1500 m	0,02	1 m/s	1000 m/s	100 m

Pontos internos

Para o cálculo do transiente hidráulico nos pontos internos da tubulação, foram utilizadas as Equações 5, para a característica positiva, e 6, para a característica negativa obtidas pela integração das Equações 3 e 4.

$$C^+: H_{i,t+\Delta t} = C_A - B_A Q_{i,t+\Delta t} \quad (5a)$$

$$C_A = H_{i-1,t} + B Q_{i-1,t} \quad (5b)$$

$$B_A = B + R |Q_{i-1,t}| \quad (5c)$$

$$C^-: H_{i,t+\Delta t} = C_B + B_B Q_{i,t+\Delta t} \quad (6a)$$

$$C_B = H_{i+1,t} - B Q_{i+1,t} \quad (6b)$$

$$B_B = B + R |Q_{i+1,t}| \quad (6c)$$

Os subscritos i e t representam o trecho e o instante calculado, respectivamente. O parâmetro B é a impedância característica, dado por $B = a/gA$, e R é o coeficiente de resistência, dado por $R = f\Delta x/(2gDA^2)$. Manipulando-se as Equações 5 e 6 para se isolar os termos desejados, são obtidas as equações 7 e 8.

$$H_{i,t+\Delta t} = \frac{B_B C_A + B_A C_B}{B_A + B_B} \quad (7)$$

$$Q_{i,t+\Delta t} = \frac{C_A - C_B}{B_A + B_B} \quad (8)$$

Para que haja pares de equações em todos os trechos analisados, são necessárias condições de contorno para substituir as características positiva e negativa, a jusante e a montante, respectivamente.

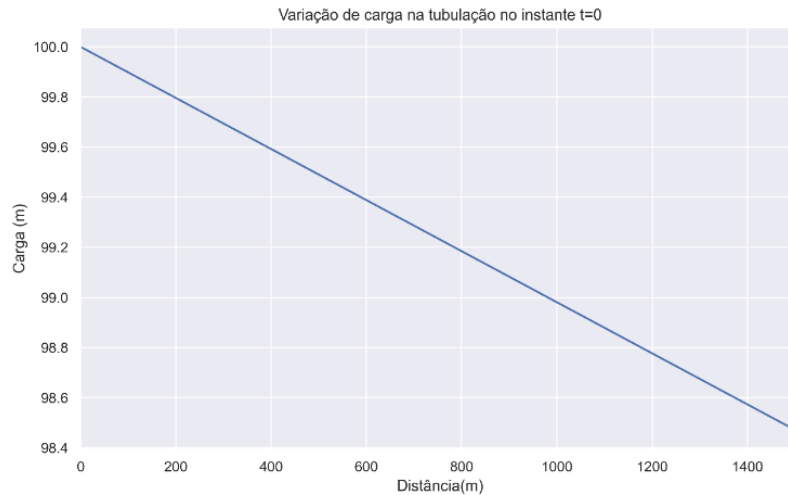


Figura 7 – Variação de carga no escoamento permanente

Condições de contorno

A montante, há um reservatório de nível fixo (H_R) em 100 m. A obtenção dos valores de carga e vazão no ponto imediatamente na saída do reservatório é dada pelas Equações 9 e 10.

$$H_{1,t+\Delta t} = H_R \quad (9)$$

$$Q_{1,t+\Delta t} = \frac{H_R - C_B}{B_B} \quad (10)$$

A jusante, há uma válvula sendo fechada, com o fechamento sendo descrito por $\tau = (1 - t/t_c)^3$ em que t_c é o tempo de fechamento total da válvula, dado por $t_c = 2L/a$. Os valores de carga e vazão na seção da válvula são dados pelas Equações 11 e 12.

$$Q_{N+1,t+\Delta t} = -B_A C_v + \sqrt{(B_A C_v)^2 + 2C_v C_A} \quad (11)$$

$$H_{N+1,t+\Delta t} = C_A - B_A Q_{N+1,t+\Delta t} \quad (12)$$

Em que o subscrito $N + 1,0$ representa a seção da válvula no instante inicial e C_v é o coeficiente da válvula, dado por $C_v = (Q_{N+1,0}\tau)^2/(2H_{N+1,0})$.

Transiente Hidráulico

Para a obtenção dos valores de carga e vazão, a simulação foi feita para os primeiros 60 segundos após o início do fechamento da válvula. Para apresentação dos resultados, foram selecionados os valores referentes as seções da válvula, apresentados na Figura 8.

Ao comparar-se o gráfico de carga em regime permanente (Figura 7) com o gráfico de carga durante o transiente hidráulico (Figura 6b), é possível perceber que o sistema é submetido a condições extremas na segunda situação, podendo atingir cargas até duas vezes mais alta do que a primeira situação. Outro aspecto interessante a se reparar é que nessa simulação, houve a atenuação do transiente hidráulico com o passar do tempo. Isso se dá devido a fricção do fluido com a tubulação, demonstrando a importância da calibração desse parâmetro para uma simulação mais próxima da situação real.

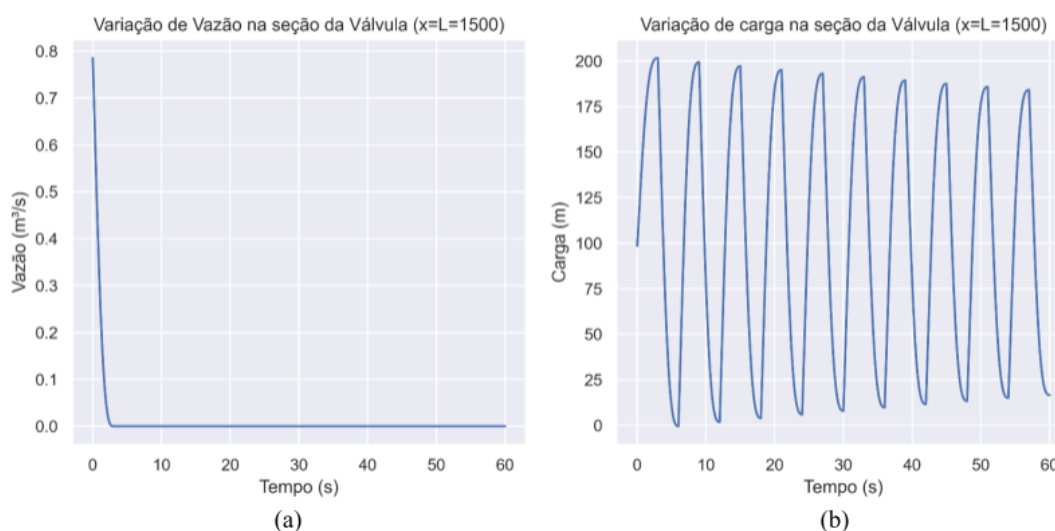


Figura 8 – Vazão (a) e carga (b) na seção da válvula e em uma seção intermediária durante o transiente hidráulico

CONCLUSÕES

O presente trabalho realizou uma revisão da literatura apresentando os diferentes modelos utilizados para simulação de transientes hidráulicos e suas aplicações. Os modelos apresentam diferentes formas de resolver as equações governantes, sendo assim, a decisão do modelo deve se basear em alguns aspectos. No geral os aspectos avaliados são acurácia e eficiência computacional.

Além disso, o trabalho também apresentou uma simulação de um cenário hipotético de um transiente causado pelo fechamento de uma válvula em um sistema reservatório-tubo-válvula. Nessa simulação foi possível observar a magnitude das pressões geradas, reforçando a importância da compreensão do fenômeno para se planejar sistemas capazes de suportar situações extremas.



A rotina computacional utilizada para o presente trabalho pode ser acessada de forma online no seguinte link: https://github.com/gnlins/Artigo_XIV_ENAU

REFERÊNCIAS

- CHAUDHRY, M. H. (2014). *Applied Hydraulic Transients*. 3 ed. Columbia, South Carolina, USA: Springer, 591 p.
- JUNG, B.S.; BOULOS P.F.; WOOD, D. J.; BROS C.M. (2009) “A Lagrangian wave characteristic method for simulating transient water column separation”. *Journal American Water Works Association*, 101, pp. 64–73
- MALISKA, C.R., (2004). *Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional*, LTC, Rio de Janeiro, Brazil.
- PAL S.; HANMAIAHGARI P.R.; LAMBERT M.F. (2020). “Efficient approach toward the application of the Godunov method to hydraulic transients”. *Journal of Hydroinformatics*; 22 (5), pp. 1370–1390.
- SALVINO, M. M. (2012). *Modelagem computacional visando a reabilitação de redes hidráulicas*. João Pessoa, 148 p.
- SOARES, A. K.; COVAS, D. I. C.; RAMOS, H. M. (2013) “Damping Analysis of Hydraulic Transients in Pump-rising Main Systems”. *Journal of Hydraulic Engineering*, v.139, n.2, p.233-243.
- WOOD, D. J.; LINGIREDDY, S.; BOULOS, P. F. (2005). *Pressure Wave Analysis of Transient Flow in Pipe Distribution Systems*. Pasadena: MWH Soft, 193 p.