



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ

CENTRO DE TECNOLOGIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

MÁRCIO BANDEIRA DE OLIVEIRA

**APROXIMAÇÃO DE 1ª E 2ª ORDENS PARA ESTUDO DE EQUAÇÕES
TRANSIENTES EM TUBULAÇÃO DE ÁGUA: UM ESTUDO COMPARATIVO**

FORTALEZA

2014

MÁRCIO BANDEIRA DE OLIVEIRA

**APROXIMAÇÃO DE 1ª E 2ª ORDENS PARA ESTUDO DE EQUAÇÕES
TRANSIENTES EM TUBULAÇÃO DE ÁGUA: UM ESTUDO COMPARATIVO**

Dissertação de Mestrado apresentada
ao Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil, como requisito parcial
para obtenção do Título de Mestre em
Engenharia Civil. Área de
concentração: Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Dr. John Kenedy de
Araújo

FORTALEZA

2014

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca de Pós-Graduação em Engenharia - BPGE

O48a Oliveira, Márcio Bandeira de.

Aproximação de 1ª e 2ª ordens para estudo de equações transientes em tubulação de água: um estudo comparativo / Márcio Bandeira de Oliveira. – 2014.

85 f. : il., enc. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Fortaleza, 2014.

Área de Concentração: Recursos Hídricos

Orientação: Prof. Dr. John Kenedy de Araújo.

1. Recursos Hídricos. 2. Transitórios hidráulicos. 3. Hidráulica computacional. I. Título.

MÁRCIO BANDEIRA DE OLIVEIRA

**APROXIMAÇÃO DE 1ª E 2ª ORDENS PARA ESTUDO DE EQUAÇÕES
TRANSIENTES EM TUBULAÇÃO DE ÁGUA: UM ESTUDO COMPARATIVO**

Dissertação de Mestrado apresentada
ao Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil, como requisito parcial
para obtenção do Título de Mestre em
Engenharia Civil. Área de
concentração: Recursos Hídricos.

Aprovada em: 20 / 01 / 2014

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. John Kenedy de Araújo (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Marco Aurélio Holanda de Castro
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Luis Henrique Magalhães Costa
Universidade Estadual Vale do Acaraú (UVA)

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus por toda ajuda que tenho recebido nesta existência, todas as oportunidades de crescimento e, sobretudo, pela chance de ensinar e aprender todos os dias.

Agradeço a minha amada esposa Geni por todo carinho, amor, dedicação e cumplicidade em todas as dificuldades e vitórias no caminho que tenho percorrido, ela sempre disposta a me ajudar e dividir comigo as alegrias e tristezas.

Agradeço a meus pais pela formação do meu caráter e todo amor que recebi ao longo de todos esses anos de estudo e trabalho. “Painho e Mainha”, como são especiais para mim.

Agradeço a minha grande amiga Sônia por toda, orientação, paciência e ajuda ao longo desses anos de amizade.

Agradeço aos professores do DEHA pelas instruções e conhecimento adquiridos e, principalmente, ao professor John Kenedy de Araújo pela paciência, dedicação e inspiração ao longo dos anos de Graduação e no Mestrado.

Aos meus irmãos e amigos, pela torcida e ajuda em momentos de dúvidas ou dificuldades.

“Embora ninguém possa voltar atrás e
fazer um novo começo, qualquer um
pode começar agora e fazer um novo
fim.”

Chico Xavier

RESUMO

O presente trabalho traz uma comparação entre as aproximações de primeira e segunda ordem para as equações características como solução para o fenômeno transiente em uma tubulação. Foram testadas oito situações que resultaram em dezesseis cenários de cálculo. Procurou-se demonstrar a eficiência do método das características (MOC) com a aproximação de 1ª ordem para pequenas variações do fator de atrito em relação à aproximação de 2ª ordem comprovando ser suficiente a primeira, para os exemplos estudados levando em consideração o termo de atrito como referência de estabilidade. Demonstrou-se também um estudo hipotético simulando a instabilidade para altos termos de atrito.

Palavras-Chave: Transiente hidráulico. Método das características. Aproximação de 1ª e 2ª ordens.

ABSTRACT

This paper provides a comparison between first and second order approaches equations for the characteristics method as a solution to the transient phenomenon in a pipeline. Eight cases were tested, which resulted in sixteen simulations calculations. Sought to demonstrate the efficiency method of characteristics (MOC) to the nearest 1st. order for small variations of the friction factor in relation to the nearest 2nd order confirming the first to be enough, for the examples studied taking into account the friction term stability as a reference. It was also demonstrated a study simulation the hypothetical instability in terms of high friction.

Key-Words: Transient Hidraulic. Method of Characteristics. First and Second approach.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Características no plano $x-t$	20
Figura 2 – Trecho da planilha Excel para Cálculo de H_p e Q_p	26
Figura 3 – Trecho da planilha Excel para Cálculo de H_p e Q_p	27
Figura 4 – Desenho esquemático seções de estudo tubulação 1.	32
Figura 5 – Desenho esquemático seções de estudo tubulação 1 e 2	34
Figura 6 - Vazão ($m^3.s^{-1}$) x tempo (s) na válvula a jusante.Válvula fechando em 2,1s	40
Figura 7 - Vazão ($m^3.s^{-1}$) x tempo (s) na válvula a jusante. Válvula fechando em 0,5s	40
Figura 8 - Carga (m) x tempo (s) na válvula a jusante. Válvula fechando em 2,1s.....	43
Figura 9 - Carga (m) x tempo (s) na válvula a jusante. Válvula fechando em 0,5 s	43
Figura 10 - Vazão ($m^3.s^{-1}$) x tempo (s) na seção $x/L = 0,8$. Válvula fechando em 2,1s	46
Figura 11 - Vazão ($m^3.s^{-1}$) x tempo (s) na seção $x/L = 0,8$. Válvula fechando em 0,5s	46
Figura 12 - Carga (m) x tempo (s) na seção $x/L = 0,8$. Válvula fechando em 2,1s.....	49
Figura 13 - Carga (m) x tempo (s) na seção $x/L = 0,8$. Válvula fechando em 0,5 s	49
Figura 14 - Vazão ($m^3.s^{-1}$) x tempo (s) na seção $x/L = 0,6$. Válvula fechando em 2,1s	52

Figura 15 - Vazão ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$) x tempo (s) na seção $x/L = 0,6$. Válvula fechando em 0,5s	52
Figura 16 - Carga (m) x tempo (s) na seção $x/L = 0,6$. Válvula fechando em 2,1s.....	55
Figura 17 - Carga (m) x tempo (s) na seção $x/L = 0,6$. Válvula fechando em 0,5 s	55
Figura 18 - Vazão ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$) x tempo (s) na seção $x/L = 0,4$. Válvula fechando em 2,1s	58
Figura 19 - Vazão ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$) x tempo (s) na seção $x/L = 0,4$. Válvula fechando em 0,5s	58
Figura 20 - Carga (m) x tempo (s) na seção $x/L = 0,4$. Válvula fechando em 2,1s.....	61
Figura 21 - Carga (m) x tempo (s) na seção $x/L = 0,4$. Válvula fechando em 0,5 s	61
Figura 22 - Vazão ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$) x tempo (s) na seção $x/L = 0,2$. Válvula fechando em 2,1s	64
Figura 23 - Vazão ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$) x tempo (s) na seção $x/L = 0,2$. Válvula fechando em 0,5s	64
Figura 24 - Carga (m) x tempo (s) na seção $x/L = 0,2$. Válvula fechando em 2,1s.....	67
Figura 25 - Carga (m) x tempo (s) na seção $x/L = 0,2$. Válvula fechando em 0,5s	67
Figura 26 - Vazão ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$) x tempo (s) na válvula a jusante.Válvula fechando em 2,1s	70
Figura 27 - Vazão ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$) x tempo (s) na válvula a jusante. Válvula fechando em 0,5s	70

Figura 28 - Carga (m) x tempo (s) na válvula a jusante. Válvula fechando em 2,1s.....	72
Figura 29 - Carga (m) x tempo (s) na válvula a jusante. Válvula fechando em 0,5 s	72
Figura 30 - Vazão ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$) x tempo (s) na seção intermediária .Válvula fechando em 2,1s	74
Figura 31 - Vazão ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$) x tempo (s) na seção intermediária. Válvula fechando em 0,5s	74
Figura 32 - Carga (m) x tempo (s) na seção intermediária. Válvula fechando em 2,1s.....	76
Figura 33 - Carga (m) x tempo (s) na seção intermediária. Válvula fechando em 0,5 s	76

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Condições iniciais do reservatório.....	32
Quadro 2 - Condições iniciais do reservatório.....	34
Quadro 3 - Condições iniciais do estudo para cenário hipotético.....	36
Quadro 4 - Cenários de 1 a 10 para tubulação sem variação de diâmetro	37
Quadro 5 - Valores de vazão ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) para cenários de 1 a 5	38
Quadro 6 - Valores de vazão ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) para cenários de 6 a 10	39
Quadro 7 - Valores de carga (m) para cenários de 1 a 5	41
Quadro 8 - Valores de carga (m) para cenários de 6 a 10	42
Quadro 9- Valores de vazão ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) para cenários de 1 a 5	44
Quadro 10- Valores de vazão ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) para cenários de 6 a 10	45
Quadro 11 - Valores de carga (m) para cenários de 1 a 5	47
Quadro 12 - Valores de carga (m) para cenários de 6 a 10	48
Quadro 13 - Valores de vazão ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) para cenários de 1 a 5	50
Quadro 14 - Valores de vazão ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) para cenários de 6 a 10	51
Quadro 15- Valores de carga (m) para cenários de 1 a 5	53
Quadro 16 - Valores de carga (m) para cenários de 6 a 10	54
Quadro 17 - Valores de vazão ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) para cenários de 1 a 5	56
Quadro 18 - Valores de vazão ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) para cenários de 6 a 10	57
Quadro 19 - Valores de carga (m) para cenários de 1 a 5	59
Quadro 20 - Valores de carga (m) para cenários de 6 a 10	60
Quadro 21 - Valores de vazão ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) para cenários de 1 a 5	62

Quadro 22 - Valores de vazão ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$) para cenários de 6 a 10	63
Quadro 23 - Valores de carga (m) para cenários de 1 a 5	65
Quadro 24 - Valores de carga (m) para cenários de 6 a 10	66
Quadro 25 - Cenários de 1 a 6 para tubulação com diâmetros D1 e D2	68
Quadro 26 - Valores de vazão ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$) para cenários de 1 a 6	69
Quadro 27- Valores de carga (m) para cenários de 1 a 6	71
Quadro 28 - Valores de vazão ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$) para cenários de 1 a 6	73
Quadro 29 - Valores de carga (m) para cenários de 1 a 6	75
Quadro 30 – Valores de Vazão e Carga na válvula a jusante para situação teste com aproximação de 1ª Ordem.....	77
Quadro 31 – Valores de Vazão e Carga na válvula a jusante para situação teste com aproximação de 2ª. Ordem.....	77

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área da seção transversal do tubo
a	Celeridade da onda
B	Variável auxiliar
C^-	Linha característica negativa
C^+	Linha característica positiva
Cn	Número de <i>Courant-Friedrich-Lewy</i>
Cr	Critério de estabilidade
D	Diâmetro interno da tubulação
f	Fator de atrito de Darcy-Weisbach
F	Função
g	Aceleração da gravidade
H	Carga hidráulica
H_r	Carga hidráulica no Reservatório
H_o	Carga hidráulica inicial
H_J	Carga hidráulica a Jusante
H_m	Carga hidráulica a montante
H_P	Carga hidráulica no ponto P
Q	Vazão
Q_j	Vazão a Jusante
Q_m	Vazão a Montante
Q_P	Vazão no ponto P
R	Constante do termo do atrito
Rey	Número de Reynolds
t	Tempo
t_o	Tempo inicial
V_o	Velocidade inicial
τ	Coeficiente (lei) de abertura (ou fechamento) relativo da válvula
ν	Viscosidade cinemática
Δt	Intervalo de tempo computacional
Δx	Intervalo de espaço

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	14
1.1 Generalidades	14
1.2 Objetivos	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
2.1 Método das Características.....	16
2.2 Fator de Atrito.....	18
2.3 Equações fundamentais do método das características	20
3 METODOLOGIA	23
3.1 Linha de Água para tubulação com diâmetro fixo	23
3.1.1 Seções intermediárias	25
3.1.2 Válvula a jusante.....	28
3.1.3 Reservatório a montante.....	29
3.2 Linha de Água para tubulação com dois diâmetros.....	29
3.2.1 Seções Intermediárias para trechos com dois diâmetros	29
3.3 Condições iniciais do reservatório para tubulação sem variação de diâmetro	32
3.4 Condições iniciais do reservatório para tubulação com diâmetros D1 e D2 ...	34
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	37
4.1 Válvula a Jusante.....	38
4.2 Seção $x/L = 0,8$	44
4.3 Seção $x/L = 0,6$	50
4.4 Seção $x/L = 0,4$	56
4.5 Seção $x/L = 0,2$	62
4.6 Válvula a Jusante.....	69
4.7 Seção Intermediária.....	73
4.8 Análise de Resultados	78
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	83
REFERÊNCIAS.....	84

1 INTRODUÇÃO

1.1 Generalidades

Na hidráulica transiente, estudamos as variações de vazão e pressão decorridas em fluxos no interior de condutos provocadas por algum tipo de alteração que pode ser voluntária ou não. O fechamento ou abertura de uma válvula, a interrupção do bombeamento numa linha de água, dentre outras causas, pode causar o fenômeno transiente com variações de pressão e vazão ocasionando rupturas ou esmagamentos em trechos da tubulação dependendo da severidade desse transiente.

O fechamento de uma válvula pode ser lento ou rápido, voluntário ou involuntário e a combinação de qualquer um desses cenários, pode causar transientes mais ou menos severos ao longo dos condutos.

Além do fechamento rápido de válvulas e interrupção do bombeamento numa linha de água, Stone (2006) cita falhas no sistema de controle, perdas de energia, perda de telemetria, interação de múltiplos serviços e má seleção de equipamentos com possíveis causas para fenômenos transientes.

O fenômeno transiente também conhecido como Golpe de Ariete produz uma onda de pressão sobre a tubulação devido a modificação brusca do movimento do líquido.

Denomina-se golpe de ariete ao choque violento que se produz sobre paredes de um conduto forçado quando o movimento do líquido é modificado bruscamente. Em outras palavras, é a sobrepressão que as canalizações recebem quando, por exemplo, se fecha um registro, interrompendo-se o escoamento. (AZEVEDO NETTO, 1998)

Segundo Chaudhry (1986), o fenômeno transiente é definido quando as condições de estabilidade do fluxo mudam de um estado para outro num intervalo de tempo considerado.

Essa mudança provoca efeitos em condutos forçados que podem ser desastrosos ou não dependendo da força da onda de choque observada na tubulação.

Segundo Araújo (2003), os estudos transientes em redes de distribuição, pode ser de difícil análise e envolver um grande esforço matemático. Esse estudo é de fundamental importância, pois a severidade do fenômeno

transiente não pode ser negligenciada tendo em vista a proteção dos sistemas de abastecimento, haja vista que algum tipo de acidente na linha de fornecimento poderá interromper o abastecimento de toda uma população.

Segundo Souza (1998), a análise em regime não permanente em redes tem sido realizada principalmente de duas maneiras:

- Predição de transientes rápidos com altas frequências, usando modelos de coluna elástica;
- Predição de transientes lentos com baixas frequências, usando modelos de coluna rígida.

Para estudo do golpe de aríete utilizaremos o modelo da coluna elástica onde os efeitos elásticos da água e tubulação são considerados para análise do fenômeno transiente.

1.2 Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo o estudo do fenômeno transiente para fluxos de água provocados pelo fechamento de válvula utilizando o método das características como ferramenta de cálculo.

Wylie e Streeter (1978) sugerem uma aproximação de 1ª Ordem como solução satisfatória das equações características.

Segundo Araújo (2003), se o termo de atrito nas equações características tornar-se muito alto, essa aproximação de primeira ordem poderá retornar resultados instáveis. Para tanto sugere um método preditor-corretor ou uma aproximação de 2ª Ordem.

Pretendemos estudar e comprovar que, para baixos fatores de atrito, encontramos resultados semelhantes comparando as aproximações de 1ª e 2ª ordens sugeridas por Wylie e Streeter (1978), confirmando que a aproximação de 1ª ordem do termo de atrito para esses casos é satisfatória como solução.

Utilizaremos a planilha Excel como ferramenta de modelagem das equações características para aproximação de 2ª Ordem do termo de atrito e compararemos os resultados com a aproximação de 1ª Ordem.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Método das características

Tomemos as equações:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{fQ|Q|}{2DA} = 0, \text{conservação do momentum} \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{a^2 \partial Q}{gA \partial x} = 0, \text{conservação da massa} \quad (2.2)$$

O fluxo transiente em um conduto forçado é regido pelas equações 2.1 e 2.2 onde H é a carga hidráulica, Q é a vazão, A é a área da seção transversal do tubo, a é a celeridade da onda de pressão, D é o diâmetro interno da tubulação, f é o fator de atrito de Darcy-Weisbach, g é a aceleração da gravidade, x é a distância e t o tempo. Estas equações não possuem soluções analíticas simples. A saída então seria a utilização de métodos numéricos como solução para as mesmas. Devemos transformar as equações 2.1 e 2.2 em equações diferenciais ordinárias para serem resolvidas.

Segundo Araújo (2003), o fenômeno transiente pode ser analisado considerando 2 modelos cujas diferenças são:

- a) Modelo Rígido: Modelo no qual não se considera os efeitos elásticos da água e tubulação. Utilizados para descrever fenômenos de oscilação de massa.
- b) Modelo Elástico: Modelo no qual se consideram os efeitos elásticos da água e tubulação. Utilizado para análise do golpe de aríete.

Na modelação do fenômeno transiente utilizaremos o modelo de coluna elástica através do método das características pelo fato do mesmo considerar os efeitos elásticos da água em um conduto.

Araújo (2003) explica que as equações 2.1 e 2.2 são equações diferenciais parciais não-lineares. Elas serão discretizadas e linearizadas no modelo da coluna elástica. O transiente hidráulico pode ser expresso matematicamente através das mesmas e elas calculam a vazão Q e carga H na tubulação no tempo t e posição x .

Para resolver sistemas de equações diferenciais torna-se necessário um método numérico e condições de contorno apropriadas.

Temos como exemplo de métodos numéricos os seguintes: Método das características, Método do contorno Integral, Método dos volumes finitos, Método dos elementos Finitos, Método Espectral, e Método das diferenças Finitas.

A preferência pelo método das características se justifica pelo fato do fenômeno transiente seguir uma lei de propagação de ondas que associa o tempo t com a posição x definida ao longo da canalização através da celeridade. A vantagem do Método é apresentar a possibilidade de obter equações explícitas para determinação das cargas H e vazões Q , quando utilizamos a aproximação de 1ª Ordem como solução das equações características.

Segundo Chaudry (1987), se for usada uma aproximação de 1ª Ordem, onde a vazão Q é devida ao regime permanente e a vazão calculada na interação anterior oferece valores satisfatórios para engenharia, se o termo de atrito tornar-se significativamente grande, então esta aproximação de 1ª Ordem pode fornecer resultados instáveis, por exemplo, em tubos rugosos com diâmetro pequeno ou variação elevada de vazão ou elevado intervalo de tempo numérico.

Segundo Araújo (2003), para pequenos intervalos de tempo as técnicas de 1ª ordem sugeridas por Wylie e Streeter (1978) são suficientemente viáveis e precisas, mas se o termo de atrito torna-se muito grande, essa aproximação pode retornar resultados instáveis o que, para tanto, uma aproximação de 2ª ordem ou um método predictor-corretor seriam indicados para evitar instabilidades.

O critério de estabilidade citado por Wylie e Streeter (1978) para a aproximação de primeira ordem das equações características em conformidade com o exposto no parágrafo anterior seria:

$$\frac{f \cdot \Delta t \cdot \bar{Q}}{4 \cdot D \cdot A} \leq 1 \quad (2.3)$$

Segundo o autor, quando essa condição é satisfeita, devemos usar a aproximação de 1ª. Ordem como solução das equações transientes. Quando essa condição chegar próximo a zero, o autor garante ser satisfatória essa aproximação.

Holloway e Chaudry (1985) fazem referência ao mesmo critério de estabilidade para baixos termos de atrito: $Cr=[f.Q.\Delta t/(4DA)] \leq 1$ onde Q é a vazão, Δt é intervalo de tempo, A é a área da seção transversal do tubo, D é o diâmetro interno da tubulação e f é o fator de atrito de Darcy-Weisbach.

Observamos que os valores de vazão que satisfazem para engenharia o modelo de 1ª Ordem tem que está dentro desse limite apresentado.

2.2 Fator de atrito.

Na equação do momentum exposta no item anterior, a terceira parcela representa o termo de atrito, parcela esta importante e representativa para as equações do transitório hidráulico.

O coeficiente de atrito f , sem dimensões, é função do número de Reynolds e da rugosidade relativa. A espessura ou altura e das asperezas (rugosidade) dos tubos pode ser avaliada determinando-se valores para e/D . (AZEVEDO NETTO, 1998, p. 160)

As equações 2.1 e 2.2 após linearizadas e discretizadas através do método das características apresentam a seguinte forma integral:

$$C^+ : \int_M^P dH + B \int_M^P dQ + \frac{fa}{2gDA^2} \int_M^P Q|Q|dt = 0 \quad (2.4)$$

$$C^- : -\int_j^P dH + B \int_j^P dQ + \frac{fa}{2gDA^2} \int_j^P Q|Q|dt = 0 \quad (2.5)$$

Onde:

B = Variável auxiliar

Q = vazão em m^3/s .

H = Carga Hidráulica em m.

f = fator de atrito

D = Diâmetro da tubulação em m

A = Área da seção do tubo em m^2

a = Celeridade m/s

Observamos que a terceira parcela representa as perdas por atrito, termos estes, que serão descritas soluções de 1ª e 2ª ordem sugeridas por Wylie e Streeter (1978).

A modelagem do fator de atrito em escoamento transitório geralmente é feita considerando-o constante e de valor igual ao do escoamento permanente inicial. Não é levado em conta que, durante o transitório, o perfil de velocidade altera-se a cada instante, inclusive havendo o escoamento reverso. Durante um transitório é possível a ocorrência de um perfil de velocidade que gere uma vazão nula com tensão de cisalhamento na parede do tubo diferente de zero. (LIMA, 2006, p.5)

Podemos apurar um pouco mais os resultados fazendo esse fator de atrito variar conforme a velocidade instante a instante. A partir da velocidade a cada instante o número Reynolds variará conforme o valor desta e consequentemente teremos variações do fator de atrito que poderá ser discreta ou até mais acentuada dependendo da natureza do transitório, tipo de tubulação e diâmetro.

O número de Reynolds é a relação entre forças de inércia e forças viscosas e pode ser expresso como:

$$Re_y = \frac{4Q}{\pi D \nu} \quad (2.6)$$

Onde Q é vazão, D é o diâmetro da tubulação e ν a viscosidade cinemática da água.

Comparando-se o comentário de LIMA e NETO, observamos a importância do coeficiente de atrito f na equação do momentum e que, nas equações características, as quais definiremos mais na frente, surge como termo fundamental para solução dos problemas transientes que estudaremos.

No fenômeno transiente, a variação de vazão instante a instante devido à onda de choque causada, por exemplo, por fechamento rápido de válvulas, provoca a variação do termo de atrito posto que o mesmo depende do número de Reynolds e este da vazão.

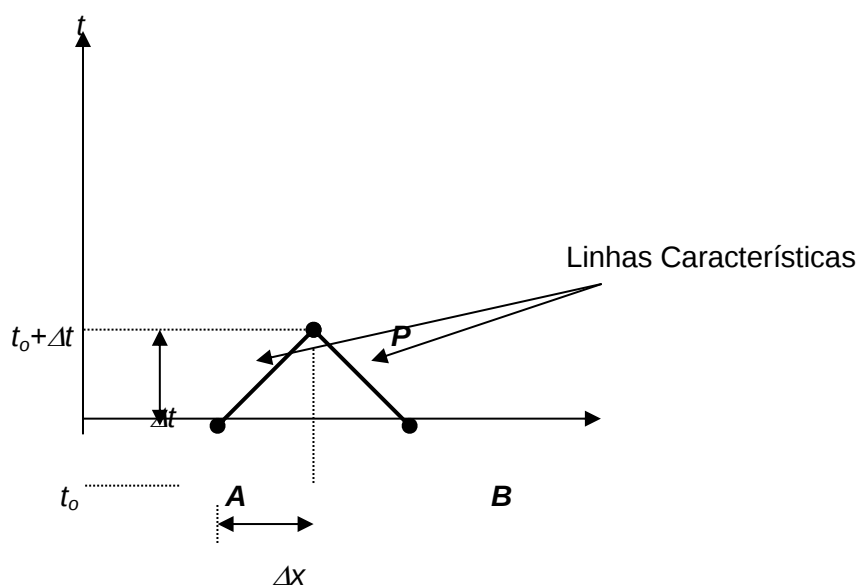
No trabalho em questão, fizemos o termo de atrito variar conforme a velocidade instante a instante nos diferentes trechos estudados, a fim de obtermos uma melhor aproximação de resultados na utilização do método numérico de resolução.

2.3 Equações fundamentais do método das características

O fenômeno transiente é expresso através das equações 2.1 Conservação do Momentum e 2.2 Conservação da Massa, que permitem calcular ao longo da posição x e tempo t dentro da tubulação. (Chaudry (1987); Wylie e Steeeter (1978) apresentam deduções dessas equações e aplicações em redes hidráulicas.

Conforme malha para solução de problemas transientes proposta por WYLIE e STREETER (1978):

Figura 1 – Linhas Características no plano $x-t$



Fonte: ARAÚJO (2003)

A malha de discretização exposta permite o calculo da vazão Q_p e carga H_p no tempo $t_0 + \Delta t$ a partir das vazões e cargas a montante Q_m e H_m e jusante Q_j e H_j conforme as equações características C^+ e C^- . A aproximação de 1ª ordem para as equações 4 e 5, sugeridas pelo autor são :

$$C^+ : H_p - H_m + B(Q_p - Q_m) + R(Q_m)|Q_m| = 0 \quad (2.7)$$

$$C^- : H_p - H_j - B(Q_p - Q_j) - R(Q_j)|Q_j| = 0 \quad (2.8)$$

As constante R e B são, respectivamente, constante do termo de atrito e constante auxiliar e serão descritas na metodologia.

Quando o termo de atrito torna-se consideravelmente grande como, por exemplo, em tubos rugosos com pequenos diâmetros, torna-se necessário uma aproximação de 2ª Ordem para estabilização e melhor calibração do modelo.

Segundo Chaudry (1985), o método acima descrito deve observar a condição de estabilidade de *Courant-Friedrich-Lewy(CFL)*, onde:

$$C_N = \frac{a\Delta t}{\Delta x} \leq 1 \quad (2.9)$$

É importante observar essa condição que garante a estabilidade do modelo. Podemos variar o intervalo de tempo Δt o que faz variar o espaço Δx mantendo-se a celeridade constante. No entanto, a condição de *Courant-Friedrich-Lewy(CFL)* tem que ser mantida.

Para verificarmos o comportamento das Cargas e Vazões nas equações transientes, utilizamos a aproximação de 2ª Ordem para as equações 2.4 e 2.5 propostas por Streeter (Fluid Transients by Wiley & Streeter) , são elas:

$$C+ : H_p - H_m + B(Q_p - Q_m) + \frac{R}{4}(Q_m + Q_p)|Q_m + Q_p| = 0 \quad (2.10)$$

$$C- : H_p - H_j - B(Q_p - Q_j) - \frac{R}{4}(Q_j + Q_p)|Q_j + Q_p| = 0 \quad (2.11)$$

As equações acima citadas contribuem para estabilizar o casos onde há considerável crescimento do termo de atrito. Holloway e Chaudry (1985) citam no seu artigo duas aproximações de segunda ordem para o termo de atrito:

$$\int_M^P RQ|Q|dt = R\Delta t(Q_M|Q_M| + Q_P|Q_P|)/2 \quad (2.12)$$

$$\int_M^P RQ|Q|dt = R\Delta t(Q_M + Q_P)|Q_M + Q_P|/4 \quad (2.13)$$

As aproximações de segunda ordem para o termo de atrito propostas nas equações 2.10 e 2.11 precisam de solução implícita o que demanda um maior esforço computacional de cálculo.

Observamos que a aproximação do fator de atrito exposta na equação 2.13 Aparece na equação 2.10. Wylie e Streeter (1978, p. 53) “propõe o uso de métodos numéricos para cálculo de Q_p na C^+ e C^- .”

Foi utilizado como ferramenta de cálculo para solução das equações implícitas de segunda ordem, o Microsoft EXCEL na função atingir meta que faz uso de método numérico para chegar ao resultado esperado. Conheciam-se o resultado da fórmula implícita, mas desejava-se encontrar o valor de entrada que tornar-se verdadeiro aquele resultado.

Person (1995, p. 784), “explica que a ferramenta Goal Seek (atingir meta) pode ser usada quando se conhece o resultado da célula e deseja-se localizar um valor de entrada para atingir este resultado”.

Segundo Bloch (2011, p. 211), “é possível usar o recurso atingir meta (Goal Seek), quando você conhece o resultado de uma fórmula, mas não conhece o valor de entrada necessário para determinar esse resultado.” Ao utilizar o recurso citado, o EXCEL muda o valor de uma célula específica até a fórmula, que depende do valor contido nessa célula, retornar o resultado desejado.

3 METODOLOGIA

3.1 Linha de Água para tubulação com diâmetro fixo.

Partimos das equações características de 1ª Ordem:

$$C+ : H_p - H_m + B(Q_p - Q_m) + R(Q_m)|Q_m| = 0 \quad (2.7)$$

$$C- : H_p - H_j - B(Q_p - Q_j) - R(Q_j)|Q_j| = 0 \quad (2.8)$$

Onde:

R = Constante do termo de atrito

B = Variável auxiliar

H_p = Carga no tempo $t_0 + \Delta t$

Q_p = Vazão no tempo $t_0 + \Delta t$

H_m = Carga a montante no tempo t_0

Q_m = Vazão a montante no tempo t_0

H_j = Carga a jusante no tempo t_0

Q_j = Vazão a jusante no tempo t_0

Para verificarmos o comportamento das Cargas e Vazões nas equações transientes na válvula a jusante, utilizou-se a aproximação de 1ª Ordem acima proposta (C+) por Streeter (Wiley & Streeter, 1978) e, de forma implícita, encontrou-se a solução Q_p :

$$Q_p^2 - \frac{(Q_0 \tau)^2}{H_0} [H_m - B.(Q_p - Q_m) - R.(Q_m)|Q_m|] = 0 \quad (3.1)$$

Onde :

H_0 = Carga inicial para $t=0$ na válvula a jusante

Q_0 = Vazão inicial para $t=0$ na válvula a jusante

τ = tao = Lei de fechamento da válvula

A lei de fechamento da válvula (curva de fechamento) representa a forma como o coeficiente de descarga varia com a abertura da mesma. As curvas de fechamento das válvulas utilizadas nos exemplos, estão apresentadas no item

3.3 deste trabalho nos cenários de 1 a 10 para tubulação sem variação de diâmetro e cenários de 1 a 6 para tubulação com dois diâmetros.

Para as seções intermediárias encontrou-se as seguintes equações explícitas para Qp e Hp :

$$Qp = \frac{Hm}{2B} - \frac{Hj}{2B} + \frac{Qm + Qj}{2} - \frac{R}{2B} \cdot [Qm \cdot |Qm| + Qj \cdot |Qj|] \quad (3.2)$$

$$Hp = \frac{Hm + Hj + B \cdot Qm - B \cdot Qj - R \cdot Qm \cdot |Qm| + R \cdot Qj \cdot |Qj|}{2} \quad (3.3)$$

Para o reservatório a montante encontrou-se a seguinte equação explícita para vazão:

$$Qp = \frac{Hr - Hj}{B} + Qj - \frac{R}{B} \cdot Qj \cdot |Qj| \quad (3.4)$$

Lembrando de Hr = Carga no reservatório que é constante.

Para verificarmos o comportamento das cargas e vazões nas equações transientes, utilizou-se, também, a aproximação de 2ª ordem proposta por Streeter (Wiley & Streeter, 1978), são elas:

$$C+ : Hp - Hm + B(Qp - Qm) + \frac{R}{4}(Qm + Qp)|Qm + Qp| = 0 \quad (2.10)$$

$$C- : Hp - Hj - B(Qp - Qj) - \frac{R}{4}(Qj + Qp)|Qj + Qp| = 0 \quad (2.11)$$

Inicialmente estudou-se um trecho de tubulação sem variação de diâmetro e desenvolveu-se as equações para as seções intermediárias, válvula a jusante e reservatório a montante. Essas expressões foram lançadas na planilha Excel para solução das interações numéricas já que as equações são implícitas.

3.1.1 Seções intermediárias

Para encontrar a vazão Q_p , isolamos a carga H_p na $C+$ e $C-$:

$$C+ : H_p = H_m - B.[Q_p - Q_m] - \frac{R}{4}[Q_m + Q_p].|Q_m + Q_p| \quad (3.5)$$

$$C- : H_p = H_j + B.[Q_p - Q_j] + \frac{R}{4}[Q_j + Q_p].|Q_j + Q_p| \quad (3.6)$$

A constante R será :

$$R = \frac{f(\Delta x)}{2gDA^2} \quad (3.7)$$

Onde:

R = Constante do termo de atrito

f = Fator de atrito

Δx = Intervalo de seção do tubo em m.

g = Aceleração da gravidade em m/s^2

D = Diâmetro da tubulação em m

A = área da Seção transversal em m^2 .

$$B = \frac{a}{g.A} \quad (3.8)$$

a = celeridade em m/s

Igualou-se H_p na equações $C+$ e $C-$:

$$H_m - B.[Q_p - Q_m] - \frac{R}{4}[Q_m + Q_p].|Q_m + Q_p| = H_j + B.[Q_p - Q_j] + \frac{R}{4}[Q_j + Q_p].|Q_j + Q_p| \quad (3.9)$$

Dessa forma encontrou-se a função $F1$:

$$H_j - H_m + B.(Q_p - Q_m) + B.(Q_p - Q_j) + \frac{R}{4}.(Q_m + Q_p).|Q_m + Q_p| + \frac{R}{4}.(Q_j + Q_p).|Q_j + Q_p| = 0 = F_1 \quad (3.10)$$

Utilizando a planilha EXCEL criou-se uma célula de interação chamada QINTERAÇÃO e escreveu-se a função F1 na mesma. O valor da VAZÃO Q_p foi encontrado numa célula chamada QRESULTANTE. Atribuiu-se o valor 1 para esta célula e utilizou-se a função atingir meta do Excel até a célula QINTERAÇÃO convergir para o valor ZERO, valor este que torna a função F verdadeira. Encontrou-se o valor da vazão Q_p que torna a função F1 ZERO.

Figura 2: Trecho da planilha Excel para calculo de H_p e Q_p

Hp:	150,00	148,70	147,40	156,75	166,88	177,48
H INTERAÇÃO		0,000	0,000	0,000	0,000	
Qp:	0,478	0,478	0,478	0,460	0,443	0,423
QINTERAÇÃO -	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,002
Rey:						
f:						
R:	5,71	5,71	5,71	5,71	5,71	5,71
CR:	0,002188835	0,002188835	0,002188835	0,002110743	0,002030569	0,001940343
PARA T:	0,4					
Para:	x/L=0	x/L=0,2	x/L=0,4	x/L=0,6	x/L=0,8	x/L=1
T:						0,7284
Hp(Resultante):	150,00	148,70	158,01	167,60	178,65	190,87
H INTERAÇÃO		0,000	0,000	0,000	0,000	
Qp(Resultante):	0,478	0,478	0,461	0,443	0,424	0,402
QINTERAÇÃO -	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001
Rey:						
f:						
R:	5,71	5,71	5,71	5,71	5,71	5,71

Observe que a seta vermelha mostra célula QRESULTANTE onde atribuímos o valor 1 e a seta preta mostra a célula que contém a função F1.

Ainda na seção intermediária utilizou-se metodologia semelhante para encontrar H_p (Carga na seção intermediária). Partiu-se da C+ e C- e isolando o termo BQp:

$$C+ : H_p - H_m + B(Q_p - Q_m) + \frac{R}{4}(Q_m + Q_p)|Q_m + Q_p| = 0 \quad (2.10)$$

$$BQ_p = H_m - H_p + BQ_m - \frac{R}{4}(Q_m + Q_p)|Q_m + Q_p| \quad (3.11)$$

$$C- : H_p - H_j - B(Q_p - Q_j) - \frac{R}{4}(Q_j + Q_p)|Q_j + Q_p| = 0 \quad (2.11)$$

$$BQ_p = H_p - H_j + BQ_j - \frac{R}{4}(Q_j + Q_p)|Q_j + Q_p| \quad (3.12)$$

Igualando BQp na C+ e C-

$$Hm - Hp + BQm - \frac{R}{4}(Qm + Qp)|Qm + Qp| = Hp - Hj + BQj - \frac{R}{4}(Qj + Qp)|Qj + Qp| \quad (3.13)$$

Assim encontrou-se a função F2

$$2Hp - Hm - Hj - B.Qm + B.Qj + \frac{R}{4}(Qm + Qp)|Qm + Qp| - \frac{R}{4}(Qj + Qp)|Qj + Qp| = 0 = F_2 \quad (3.14)$$

Utilizando a planilha EXCEL criou-se uma célula de interação chamada HINTERAÇÃO e escreveu-se a nova função F2 na mesma. O valor da CARGA Hp foi encontrado numa célula chamada HRESULTANTE. Atribuiu-se o valor 1 para esta célula e utilizou-se a função atingir meta do Excel até a célula HINTERAÇÃO convergir para o valor ZERO, valor este que torna a função F2 verdadeira. Encontrou-se o valor da carga Hp que torna a função F2 ZERO. O valor Qp foi encontrado na equação 3.10. Também podemos calcular Hp de forma explícita isolando o termo $2Hp$ do lado direito e dividindo todas as parcelas por -2.

Figura 3: Trecho da planilha Excel para cálculo de Hp e Qp

Hp:	150,00	148,70	147,40	156,75	166,38	177,48
H INTERAÇÃO		0,000	0,000	0,000	0,000	
Qp:	0,478	0,478	0,478	0,460	0,443	0,423
Q INTERAÇÃO -	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,002
Rey:						
f:						
R:	5,71	5,71	5,71	5,71	5,71	5,71
CR:	0,002188835	0,002188835	0,002188835	0,002110743	0,002030569	0,001940343
PARA T:	0,4					
Para:	x/L=0	x/L=0,2	x/L=0,4	x/L=0,6	x/L=0,8	x/L=1
T:						0,7284
Hp(Resultante):	150,00	148,70	158,01	167,60	178,65	190,87
H INTERAÇÃO		0,000	0,000	0,000	0,000	
Qp(Resultante):	0,478	0,478	0,461	0,443	0,424	0,402
Q INTERAÇÃO -	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001
Rey:						
f:						
R:	5,71	5,71	5,71	5,71	5,71	5,71

No quadro 1 a seta vermelha mostra célula HRESULTANTE onde atribuímos o valor 1 e a seta preta mostra a célula que contém a função F2.

3.1.2 Válvula a jusante

Seguindo a metodologia empregada para aproximação de 1ª Ordem, trabalhou-se com as seções na válvula a jusante. Para tanto tomou-se a C+ :

$$C+ : Hp - Hm + B(Qp - Qm) + \frac{R}{4}(Qm + Qp)|Qm + Qp| = 0 \quad (2.10)$$

Para o tempo $(t_0 + \Delta t)$ isolando Hp encontrou-se a seguinte equação

$$C+ : Hp = Hm - B(Qp - Qm) - \frac{R}{4}(Qm + Qp)|Qm + Qp| \quad (3.5)$$

E partindo da expressão:

$$Qp^2 = \frac{(Q_0 \cdot \tau)^2 \cdot Hp}{H_0} \quad (3.15)$$

Substitui-se Hp da expressão 3.5 em 3.15 temos:

$$Qp^2 - \frac{(Q_0 \cdot \tau)^2}{H_0} \cdot [Hm - B \cdot (Qp - Qm) - \frac{R}{4} \cdot (Qm + Qp) \cdot |Qm + Qp|] = 0 = F_3 \quad (3.16)$$

Utilizando a planilha EXCEL criou-se uma célula de interação chamada QINTERAÇÃO e escreveu-se a função F3 na mesma. O valor da VAZÃO Qp foi encontrado numa célula chamada QRESULTANTE. Atribuiu-se o valor 1 para esta célula e utilizou-se a função atingir meta do Excel até a célula QINTERAÇÃO convergir para o valor ZERO, valor este que torna a função F3 verdadeira. Encontramos o valor da vazão Qp que torna a função F3 ZERO.

Hp no tempo $(t_0 + \Delta t)$ será encontrada através de 3.5.

3.1.3 Reservatório a montante

Partindo da C-:

$$C-: H_p - H_j - B(Q_p - Q_j) - \frac{R}{4}(Q_j + Q_p)|Q_j + Q_p| = 0 \quad (2.11)$$

E sabendo que no reservatório $H_p = H_r = \text{Constante}$, então para cálculo de Q_p fazemos:

$$C-: H_r - H_j - B(Q_p - Q_j) - \frac{R}{4}(Q_j + Q_p)|Q_j + Q_p| = 0 = F_4 \quad (3.17)$$

Utilizando a planilha EXCEL criou-se uma célula de interação chamada QINTERAÇÃO e escreveu-se a função F4 na mesma. O valor da VAZÃO Q_p foi encontrado numa célula chamada QRESULTANTE. Atribuiu-se o valor 1 para esta célula e utilizou-se a função atingir meta do Excel até a célula QINTERAÇÃO convergir para o valor ZERO, valor este que torna a função F4 verdadeira. Encontramos o valor da vazão Q_p que torna a função F4 ZERO.

A carga no reservatório será constante e igual a H_r .

3.2 Linha de Água para tubulação com dois diâmetros.

Seguindo a mesma metodologia para uma tubulação sem variação de diâmetro, estudamos um trecho de tubulação com dois Diâmetros D1 e D2 e desenvolvemos as equações para as seções intermediárias, válvula a jusante e reservatório a montante. Essas expressões deverão ser lançadas na planilha Excel para solução das interações numéricas.

3.2.1 Seções intermediárias para trecho com dois diâmetros

Para o exemplo com variação de diâmetro de D1 para D2, no ponto de mudança de diâmetro trabalhamos com as seções imediatamente antes e depois do referido ponto e assim, analogamente a tubulação já estudada partimos da C+ e C-:

Aproximação de 1ª Ordem:

$$C+ : Hp - Hm + B_1(Qp - Qm) + R_1(Qm)|Qm| = 0 \quad (3.18)$$

$$C- : Hp - Hj - B_2(Qp - Qj) - R_2(Qj)|Qj| = 0 \quad (3.19)$$

Isolando Hp na $C+$ e $C-$, igualando as duas equações e isolando os termos que contém Qp encontramos:

$$Qp.(B_1 + B_2) = Hm + B_1.Qm - R_1.Qm|Qm| - (Hj - B_2.Qj + R_2.Qj|Qj|) \quad (3.20)$$

Isolando Qp chegamos a:

$$Qp = \frac{Hm + B_1.Qm - R_1.Qm|Qm| - Hj + B_2.Qj - R_2.Qj|Qj|}{B_1 + B_2} \quad (3.21)$$

Para cálculo de Hp , isolamos Qp na $C+$ e $C-$ e chegamos a:

$$C+ : Qp = -\frac{Hp}{B_1} + \frac{Hm}{B_1} + Qm - \frac{R_1}{B_1}.(Qm).|Qm| \quad (3.22)$$

$$C- : Qp = \frac{Hp}{B_2} - \frac{Hj}{B_2} + Qj - \frac{R_2}{B_2}.(Qj).|Qj| \quad (3.23)$$

Igualando Qp encontramos:

$$Hp = \frac{\frac{Hm}{B_1} + Qm - \frac{R_1}{B_1}.(Qm).|Qm| + \frac{Hj}{B_2} - Qj + \frac{R_2}{B_2}.(Qj).|Qj|}{\frac{1}{B_1} + \frac{1}{B_2}} \quad (3.24)$$

Aproximação de 2ª Ordem:

Analogamente a aproximação de 1ª Ordem partimos da $C+$ e $C-$ proposta por Wylie e Streeter (1978):

$$C+ : Hp - Hm + B_1(Qp - Qm) + \frac{R_1}{4}(Qm + Qp)|Qm + Qp| = 0 \quad (3.25)$$

$$C- : Hp - Hj - B_2(Qp - Qj) - \frac{R_2}{4}(Qj + Qp)|Qj + Qp| = 0 \quad (3.26)$$

Isolando Hp na $C-$ e substituindo na $C+$:

$$Hj + B_2(Qp - Qj) + \frac{R_2}{4}(Qj + Qp)|Qj + Qp| - Hm + B_1(Qp - Qm) + \frac{R_1}{4}(Qm + Qp)|Qm + Qp| = 0 \quad (3.27)$$

A expressão acima define a função $F5$:

$$Hj + B_2(Qp - Qj) + \frac{R_2}{4}(Qj + Qp)|Qj + Qp| - Hm + B_1(Qp - Qm) + \frac{R_1}{4}(Qm + Qp)|Qm + Qp| = 0 = F_5 \quad (3.28)$$

Utilizando a planilha EXCEL criamos uma célula de interação chamada QINTERAÇÃO e escrevemos a função $F5$ na mesma. O valor da VAZÃO Qp será encontrado numa célula chamada QRESULTANTE. Atribuímos o valor 1 para esta célula e utilizamos a função atingir meta do Excel e fizemos a célula QINTERAÇÃO convergir para o valor ZERO, valor este que torna a função $F5$ verdadeira.

Encontramos o valor da vazão Qp que torna a função $F5$ ZERO.

Para cálculo de Hp , isolamos Qp na $C+$ e $C-$ e chegamos a:

$$C+ : Qp = \frac{Hm - Hp}{B_1} + Qm - \frac{R_1}{4B_1} \cdot (Qm + Qp) \cdot |Qm + Qp| \quad (3.29)$$

$$C- : Qp = \frac{Hp - Hj}{B_2} + Qj - \frac{R_2}{4B_2} \cdot (Qj + Qp) \cdot |Qj + Qp| \quad (3.30)$$

Igualando Qp encontramos a expressão que define $F6$:

$$\frac{Hm - Hp}{B_1} + Qm - \frac{R_1}{4B_1} \cdot (Qm + Qp) \cdot |Qm + Qp| - \frac{Hp - Hj}{B_2} - Qj + \frac{R_2}{4B_2} \cdot (Qj + Qp) \cdot |Qj + Qp| = 0 = F_6 \quad (3.31)$$

Utilizando a planilha EXCEL criamos uma célula de interação chamada HINTERAÇÃO e escrevemos a nova função $F6$ na mesma. O valor da CARGA Hp será encontrado numa célula chamada HRESULTANTE. Atribuímos o valor 1

para esta célula e utilizamos a função atingir meta do Excel e fizemos a célula HINTERAÇÃO convergir para o valor ZERO, valor este que torna a função F6 verdadeira. Encontramos o valor da carga H_p que torna a função F6 ZERO. A vazão Q_p para interação de F6 vem do valor que torna F5 zero exposto no item “c”.

Conforme comentado na revisão bibliográfica deste trabalho, como conhecíamos o resultado das fórmulas implícitas, no caso as funções F1 a F6, utilizou-s a ferramenta Goal Seek (atingir meta) do Excel e encontrou-se os valores de Q_p e H_p para cada intervalo de tempo que tornavam as mesmas verdadeiras e iguais a Zero.

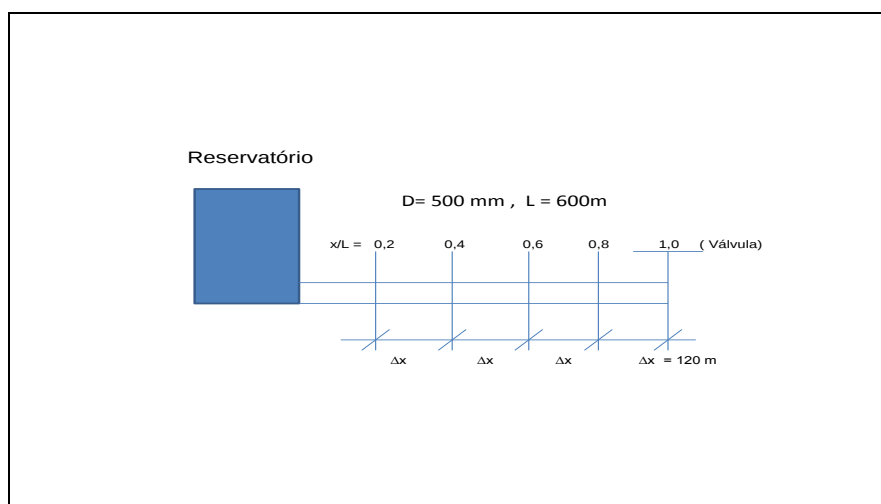
3.3 Condições iniciais do reservatório para tubulação sem variação de diâmetro.

Foi trabalhado para comparação de resultados de 1ª e 2ª ordens, os seguintes cenários.

Quadro 1 - Condições iniciais do reservatório

Hr =	150	m	Carga no Reservatório em MCA
L =	600	m	Comprimento total da tubulação
a =	1.00	m/s	Celeridade
Δx =	120	m	trecho de estudo ($x/L = 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1$)
Δt =	0,1	s	Trecho dividido pela celeridade
g =	9,81	m/s^2	Aceleração da gravidade
$\varnothing$ =	0,5	m	Diâmetro da tubulação (D)
A =	0,196	m^2	Área da seção transversal do tubo

Figura 4 – Desenho esquemático seções de estudo tubulação 1



- A) Nos cenários 1 e 6 trabalhou-se para essas condições iniciais, Fator de atrito $f = 0,018$ e rugosidade $0,29$ mm. Foram usadas as aproximações de 1ª e 2ª ordens para encontrar a carga e vazão para intervalos de $\Delta t = 0,1s$ na válvula a jusante para um tempo de fechamento da válvula $t = 2,1s$. O fator de atrito não variou instante a instante e a lei de fechamento da válvula usada foi

$$\tau = (1 - t/2,1)^{1,5}$$

- B) Nos cenários 2 e 7 trabalhou-se para essas condições iniciais, Fator de atrito inicial $f = 0,018$ e rugosidade $0,29$ mm. Foram usadas as aproximações de 1ª e 2ª ordens para encontrar a carga e vazão para intervalos de $\Delta t = 0,1s$ na válvula a jusante para um tempo de fechamento da válvula $t = 2,1s$. O fator de atrito variou instante a instante e a lei de fechamento da válvula usada foi

$$\tau = (1 - t/2,1)^{1,5}$$

- C) Nos cenários 3 e 8 trabalhou-se para essas condições iniciais, Fator de atrito inicial $f = 0,018$ e rugosidade $0,29$ mm. Foram usadas as aproximações de 1ª e 2ª ordens para encontrar a carga e vazão para intervalos de $\Delta t = 0,1s$ na válvula a jusante para um tempo de fechamento da válvula $t = 0,5s$. O fator de atrito variará instante a instante e a lei de fechamento da válvula usada foi $\tau = (1 - t/0,5)^{1,5}$

- D) Nos cenários 4 e 9 trabalhou-se para essas condições iniciais, Fator de atrito inicial $f = 0,040$ e rugosidade $6,00$ mm. Foram usadas as aproximações de 1ª e 2ª ordem para encontrar a carga e vazão para intervalos de $\Delta t = 0,1s$ na válvula a jusante para um tempo de fechamento da válvula $t = 2,1s$. O fator de atrito variou instante a instante e a lei de fechamento da válvula usada foi

$$\tau = (1 - t/2,1)^{1,5} .$$

- E) Nos cenários 5 e 10 trabalhou-se para essas condições iniciais, Fator de atrito inicial $f = 0,040$ e rugosidade $6,00$ mm . Foram usadas as aproximações de 1ª e 2ª ordem para encontrar a carga e vazão para intervalos de $\Delta t = 0,1s$ na válvula a jusante para um tempo de fechamento

da válvula $t = 0,5s$. O fator de atrito variou instante a instante e a lei de fechamento da válvula usada foi $\tau = (1 - t/0,5)^{1,5}$.

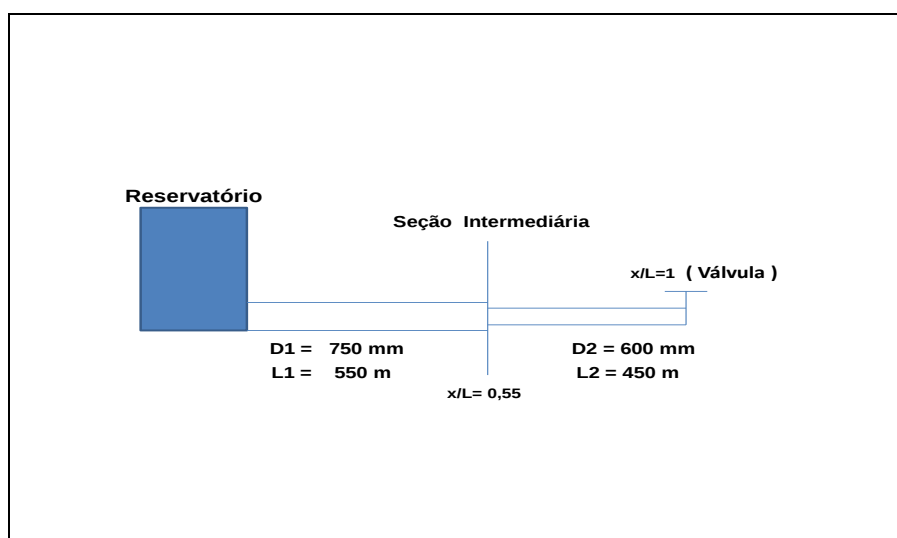
3.4 CONDIÇÕES INICIAIS DO RESERVATÓRIO PARA TUBULAÇÃO COM DIÂMETROS D1 E D2

Foi trabalhado para comparação de resultados de 1ª e 2ª ordens, os seguintes cenários.

Quadro 2 - Condições iniciais do reservatório

	TUBO 1	TUBO 2		
Hr =	67,65	67,65	m	Carga no Reservatório em MCA
L =	550	450	m	Comprimento total da tubulação
a =	1100	900	m/s	Celeridade
$\Delta x =$	550	450	m	trecho de estudo ($x/L = 0,55 ; 1$)
$\Delta t =$	0,5	0,5	s	Trecho dividido pela celeridade
g =	9,81	9,81	m/s ²	Aceleração da gravidade
$\varnothing =$	0,75	0,60	m	Diâmetro interno da tubulação (D)
A =	0,442	0,283	m ²	Área da seção transversal do tubo

Figura 5 – Desenho esquemático seções de estudo tubulação 1 e 2



- A) Nos cenários 1 e 4 trabalhou-se as seguintes condições iniciais: Fator de atrito inicial $f = 0,011$, rugosidade = 0,004mm para TUBO 1 ; inicial $f = 0,012$, rugosidade = 0,003mm para TUBO 2 . Foram usadas as aproximações de 1ª e 2ª ordens para encontrar a carga e vazão para intervalos de $\Delta t = 0,5s$ na válvula a jusante seção intermediária e reservatório para um tempo de fechamento da válvula $t = 6,0s$. O fator de atrito variou instante a instante e a lei de fechamento da válvula usada foi $\tau = (0,0042t^3 - 0,0435t^2 - 0,056t + 0,9988)$.
- B) Nos cenários 2 e 5 trabalhou-se as seguintes condições iniciais: Fator de atrito inicial $f = 0,011$, rugosidade = 0,004mm para TUBO 1; inicial $f = 0,012$, rugosidade = 0,003mm para TUBO 2 . Foram usadas as aproximações de 1ª e 2ª ordens para encontrar a carga e vazão para intervalos de $\Delta t = 0,5s$ na válvula a jusante seção intermediária e reservatório para um tempo de fechamento da válvula $t = 0,5s$. O fator de atrito variou instante a instante e a lei de fechamento da válvula usada foi $\tau = (-2t + 1)$.
- C) Nos cenários 3 e 6 trabalhou-se as seguintes condições iniciais: Fator de atrito inicial $f = 0,035$, rugosidade = 6,00 mm para TUBO 1; inicial $f = 0,038$, rugosidade = 6mm para TUBO 2. Foram usadas as aproximações de 1ª e 2ª ordens para encontrar a carga e vazão para intervalos de $\Delta t = 0,5s$ na válvula a jusante seção intermediária e reservatório para um tempo de fechamento da válvula $t = 6,0 s$. O fator de atrito variou instante a instante e a lei de fechamento da válvula usada foi $\tau = (0,0042t^3 - 0,0435t^2 - 0,056t + 0,9988)$.

Criou-se, também, um cenário hipotético onde o critério de estabilidade citado no item 2.1 (vide equação 2.3) não foi obedecido, isto é, $Cr > 1$, a fim testarmos a eficiência da aproximação de segunda ordem como solução do problema. Esse cenário simulará uma situação onde teremos um alto termo de atrito nas equações transientes de vazão e carga.

Para tal cenário as condições iniciais foram:

Quadro 3 - Condições iniciais do estudo para cenário hipotético

$L=$	600 m	Comprimento total
$a=$	1200 $m.s^{-1}$	Celeridade
$\Delta x =$	300 m	Trecho de estudo
$g=$	9,81 $m.s^{-2}$	Aceleração da gravidade
$Q=$	0,0005 $m^3.s^{-1}$	Vazão
$D=$	0,0114 m	Diâmetro
$\varepsilon=$	0,1 mm	Rugosidade
$\nu=$	0,000001	Viscosidade cinemática
$Rey=$	55.748,27	Numero de Reynolds
$f=$	0,0378	Fator de Atrito
$\Delta t =$	0,25 s	Intervalo de tempo
$Cr=$	1,01	Critério de estabilidade
$V_0=$	4,88 $m.s^{-1}$	Velocidade inicial
$\Delta h =$	1.205,16 m	Perda de carga no trecho
$\varepsilon / D=$	0,0088	Relação rugosidade/diâmetro

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após realizarmos os cálculos, encontramos os cenários para tubulação sem variação de diâmetro:

Quadro 4 –Cenários de 1 a 10 para tubulação sem variação de diâmetro

CENÁRIO	DESCRIÇÃO
1	Aproximação de 1ª ordem sem variação de f, válvula fechando em 2,1s e rugosidade 0,29 mm.
2	Aproximação de 1ª ordem com variação de f, válvula fechando em 2,1s e rugosidade 0,29 mm.
3	Aproximação de 1ª ordem com variação de f, válvula fechando em 2,1s e rugosidade 6,00 mm.
4	Aproximação de 1ª ordem com variação de f, válvula fechando em 0,5 s e rugosidade 0,29 mm.
5	Aproximação de 1ª ordem com variação de f, válvula fechando em 0,5 s e rugosidade 6,00 mm.
6	Aproximação de 2ª ordem sem variação de f, válvula fechando em 2,1s e rugosidade 0,29 mm.
7	Aproximação de 2ª ordem com variação de f, válvula fechando em 2,1s e rugosidade 0,29 mm.
8	Aproximação de 2ª ordem com variação de f, válvula fechando em 2,1 s e rugosidade 6,00 mm.
9	Aproximação de 2ª ordem com variação de f, válvula fechando em 0,5s e rugosidade 0,29 mm.
10	Aproximação de 2ª ordem com variação de f, válvula fechando em 0,5 s e rugosidade 6,00 mm.

Para as figuras de 2 a 21 entenda-se a legenda:

1ª Ordem s/vaf f: Cenário 1

1ª Ordem c/vaf f: Cenário 2

1ª. Ordem c/vaf f_R6: Cenário 3

1ª. Ordem c/vaf f(0,5): Cenário 4

1ª. Ordem c/vaf f(0,5)_R6: Cenário 5

2ª. Ordem s/vaf f: Cenário 6

2ª. Ordem c/vaf f: Cenário 7

2ª. Ordem c/vaf f_R6: Cenário 8

2ª. Ordem c/vaf f(0,5): Cenário 9

2ª. Ordem c/vaf f(0,5)_R6: Cenário 10

Em todas os cenários a condição de Courant-Friedrich-Lewy é satisfeita.

Número de Courant : $C_n = (a \cdot \Delta t) / (\Delta x)$.

Condição de Courant: $\Delta x \geq a \cdot \Delta t$

Encontrou-se os seguintes resultados:

4.1 Válvula a Jusante:

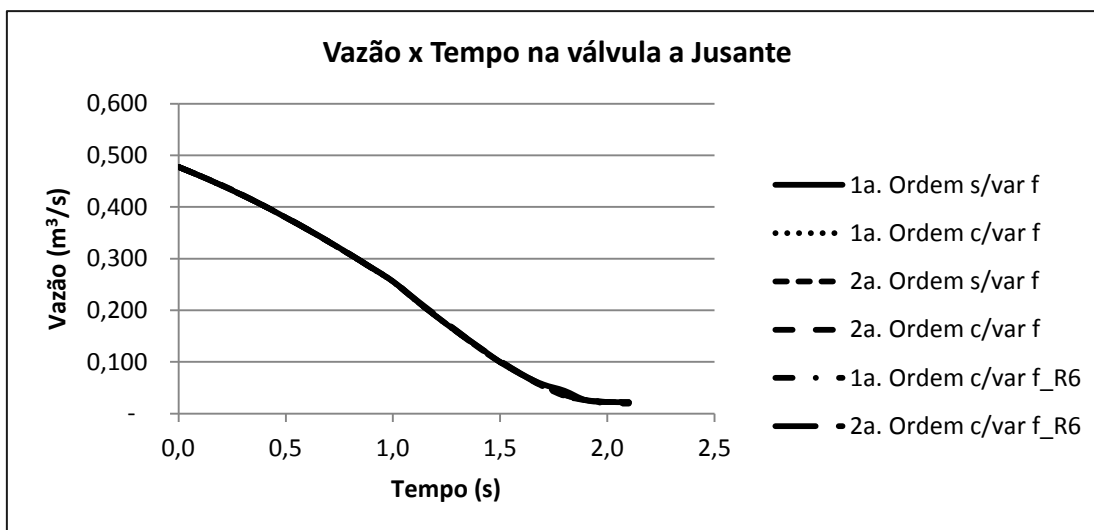
Quadro 5 - Valores de vazão ($m^3 \cdot s^{-1}$) para cenários de 1 a 5

x/L= 1 VÁLVULA A JUSANTE					
Tempo(s)	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5
0,0	0,478	0,478	0,478	0,478	0,478
0,1	0,460	0,460	0,460	0,397	0,397
0,2	0,442	0,442	0,442	0,297	0,297
0,3	0,423	0,423	0,422	0,183	0,183
0,4	0,402	0,402	0,402	0,073	0,074
0,5	0,380	0,380	0,380	0,022	0,019
0,6	0,357	0,357	0,357	0,022	0,019
0,7	0,333	0,333	0,333	0,022	0,019
0,8	0,308	0,308	0,308	0,022	0,019
0,9	0,282	0,282	0,283	0,022	0,019
1,1	0,256	0,256	0,256	0,022	0,019
1,1	0,222	0,221	0,223	0,022	0,019
1,2	0,189	0,189	0,190	0,022	0,019
1,3	0,158	0,160	0,160	0,022	0,019
1,4	0,129	0,129	0,129	0,022	0,019
1,5	0,100	0,100	0,102	0,022	0,019
1,6	0,076	0,076	0,076	0,022	0,019
1,7	0,057	0,055	0,054	0,022	0,019
1,8	0,044	0,035	0,038	0,022	0,019
1,9	0,026	0,026	0,026	0,022	0,019
2,0	0,023	0,023	0,020	0,022	0,019
2,1	0,022	0,022	0,019	0,022	0,019

Quadro 6 - Valores de vazão ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) para cenários de 6 a 10

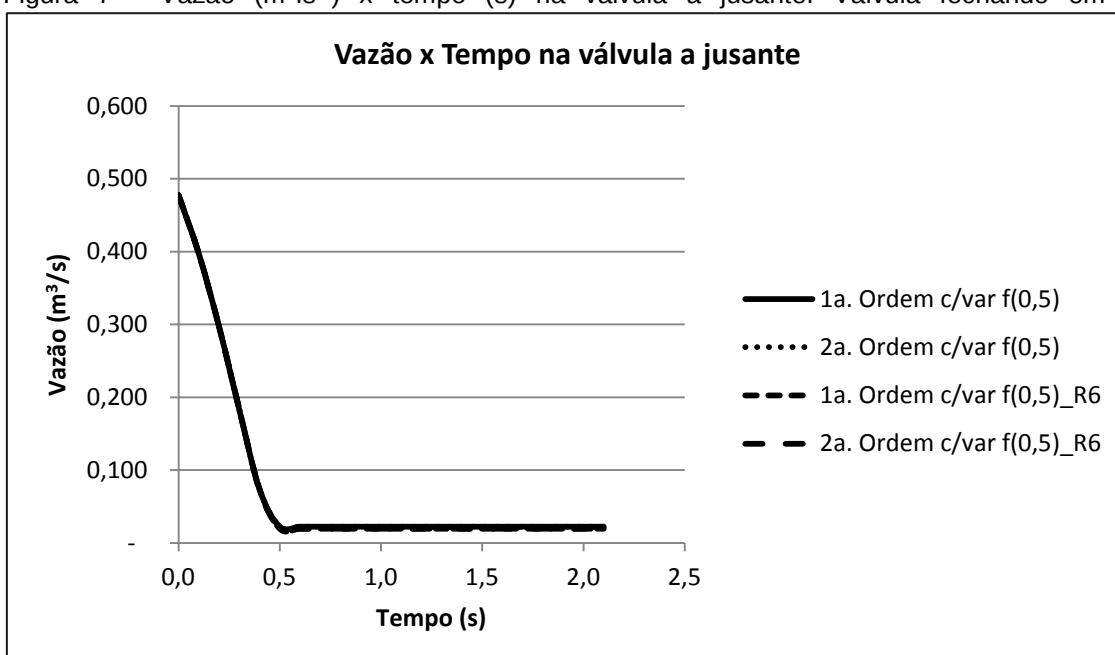
x/L= 1 VÁLVULA A JUSANTE					
Tempo(s)	Cenário 6	Cenário 7	Cenário 8	Cenário 9	Cenário 10
0,0	0,478	0,478	0,478	0,478	0,478
0,1	0,460	0,460	0,460	0,397	0,397
0,2	0,443	0,442	0,442	0,297	0,297
0,3	0,423	0,423	0,422	0,183	0,184
0,4	0,402	0,402	0,402	0,073	0,072
0,5	0,380	0,380	0,380	0,022	0,020
0,6	0,357	0,357	0,357	0,022	0,020
0,7	0,333	0,333	0,333	0,022	0,020
0,8	0,308	0,308	0,309	0,022	0,020
0,9	0,282	0,282	0,283	0,022	0, 020
1,0	0,256	0,256	0,257	0,022	0, 020
1,1	0,221	0,221	0,223	0,022	0, 020
1,2	0,189	0,189	0,191	0,022	0, 020
1,3	0,158	0,158	0,160	0,022	0, 020
1,4	0,128	0,127	0,129	0,022	0, 020
1,5	0,100	0,100	0,102	0,022	0, 020
1,6	0,076	0,076	0,077	0,022	0, 020
1,7	0,053	0,053	0,055	0,022	0, 020
1,8	0,035	0,036	0,037	0,022	0, 020
1,9	0,026	0,026	0,026	0,022	0, 020
2,0	0,023	0,023	0,023	0,022	0, 020
2,1	0,022	0,022	0,021	0,022	0, 020

Figura 6 - Vazão ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) x tempo (s) na válvula a jusante. Válvula fechando em 2,1s



Observamos pelo gráfico exposto que, comparando os cenários 1(1ª Ordem s/vaf f) e 6(2ª. Ordem s/vaf f), 2(1ª Ordem c/vaf f) e 7(2ª. Ordem c/vaf f), 3(1ª. Ordem c/vaf f_R6) e 8(2ª. Ordem c/vaf f_R6), as aproximações de 1ª e 2ª ordem retornam gráficos semelhantes, isto é, curvas coincidentes. A alteração da rugosidade não representou grandes alterações para o comportamento da vazão.

Figura 7 - Vazão ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) x tempo (s) na válvula a jusante. Válvula fechando em 0,5s



Observamos pelo gráfico exposto que, comparando os cenários 4(1ª. Ordem c/vaf $f(0,5)$) e 9(2ª. Ordem c/vaf $f(0,5)$), 5(1ª. Ordem c/vaf $f(0,5)$ _R6) e 10(2ª. Ordem c/vaf $f(0,5)$ _R6), as aproximações de 1ª e 2ª ordem retornam gráficos semelhantes, isto é, curvas coincidentes. A alteração da rugosidade não representou grandes alterações para o comportamento da vazão.

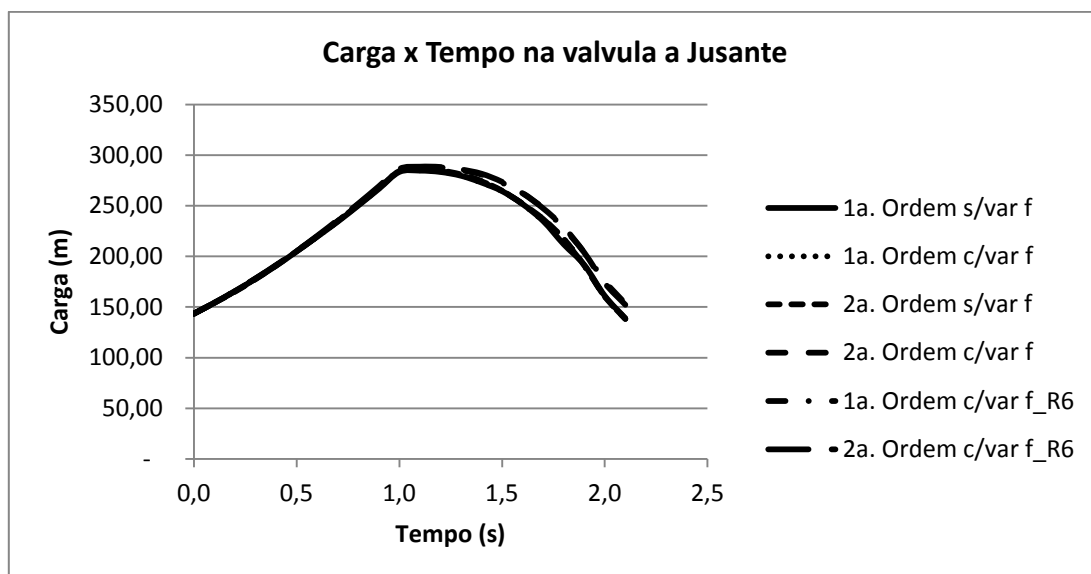
Quadro 7 - Valores de carga (m) para cenários de 1 a 5

x/L= 1 VÁLVULA A JUSANTE					
Tempo(s)	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5
0,0	143,48	143,48	143,48	143,48	143,48
0,1	154,21	154,21	154,15	193,59	193,67
0,2	165,67	165,68	165,79	256,09	255,93
0,3	177,87	177,89	178,13	327,48	327,7
0,4	190,76	191,08	191,23	396,04	396,83
0,5	204,91	204,95	205,14	428,69	432,22
0,6	219,43	219,49	219,66	429,27	433,47
0,7	235,56	234,74	235,41	430,02	435,13
0,8	251,44	250,6	251,48	430,59	436,38
0,9	267,88	267,01	268,33	432,6	440,86
1,0	284,66	283,81	285,54	433,17	442,12
1,1	285,86	285,00	287,88	335,78	348,18
1,2	284,44	283,6	287,84	213,38	229,34
1,3	280,54	279,8	285,02	73,34	91,92
1,4	273,66	272,78	280,78	-61,01	-40,18
1,5	265,01	264,48	272,64	-124,8	-107,35
1,6	252,04	251,61	262,52	-125,71	-109,29
1,7	233,99	235,01	247,58	-126,75	-111,58
1,8	210,92	217,30	227,81	-127,25	-112,7
1,9	190,45	190,91	203,92	-129,31	-117,19
2,0	159,79	160,29	175,59	-129,8	-118,31
2,1	137,71	138,34	153,45	-33,93	-27,64

Quadro 8 - Valores de carga (m) para cenários de 6 a 10

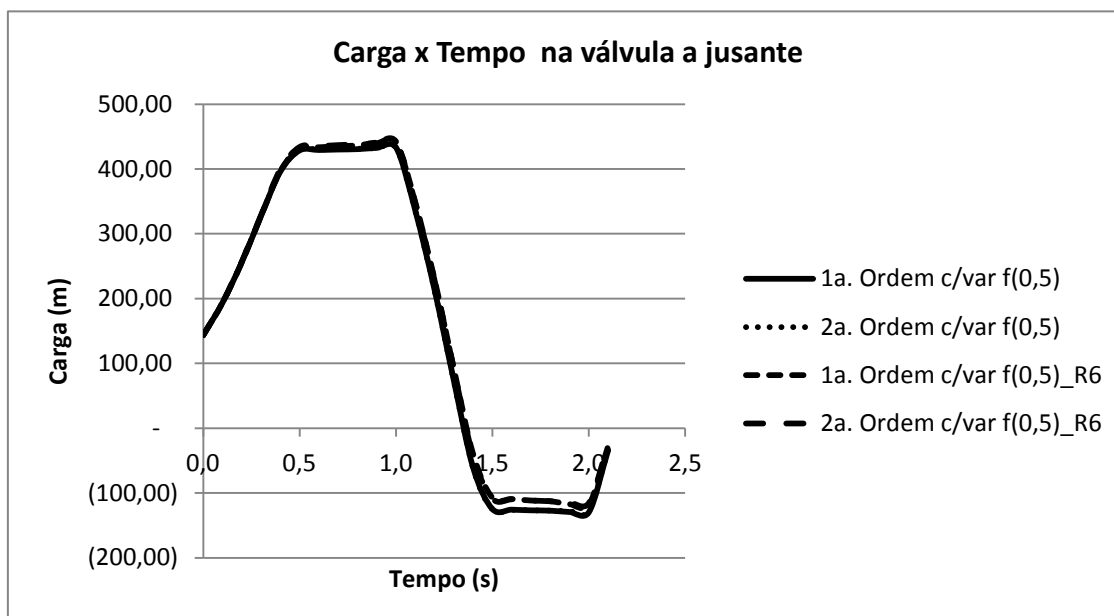
x/L= 1 VÁLVULA A JUSANTE					
Tempo(s)	Cenário 6	Cenário 7	Cenário 8	Cenário 9	Cenário 10
0,0	143,48	143,48	143,48	143,48	143,48
0,1	154,23	154,23	154,32	193,80	193,95
0,2	165,17	165,74	165,83	256,50	256,93
0,3	177,48	177,98	178,31	328,11	328,92
0,4	190,87	191,19	191,45	396,81	399,46
0,5	205,06	205,10	205,39	429,45	433,94
0,6	219,62	219,68	220,31	430,04	435,21
0,7	234,91	234,98	235,94	430,78	436,84
0,8	250,80	250,88	252,11	431,35	438,11
0,9	267,25	267,33	269,17	432,09	439,74
1,0	284,03	284,18	286,39	432,67	441,01
1,1	285,29	285,38	288,57	335,23	347,24
1,2	284,79	283,96	288,27	212,71	227,80
1,3	280,90	280,17	285,84	72,61	90,76
1,4	274,36	274,06	281,60	-61,94	-43,93
1,5	264,77	264,78	273,58	-125,38	-108,70
1,6	251,87	251,86	262,25	-125,91	-109,84
1,7	236,88	236,84	247,41	-126,69	-111,54
1,8	217,46	216,31	228,95	-127,22	-112,69
1,9	191,00	190,93	203,75	-128,00	-114,39
2,0	160,40	160,22	173,57	-128,52	-115,54
2,1	138,28	138,21	152,21	-32,82	-25,52

Figura 8 - Carga (m) x tempo (s) na válvula a jusante. Válvula fechando em 2,1s



Observamos pelo gráfico exposto que, comparando os cenários 1(1ª Ordem s/vaf f) e 6(2ª. Ordem s/vaf f), 2(1ª Ordem c/vaf f) e 7(2ª. Ordem c/vaf f), 3(1ª. Ordem c/vaf f_R6) e 8(2ª. Ordem c/vaf f_R6), as aproximações de 1ª e 2ª ordens retornaram gráficos semelhantes, isto é, curvas coincidentes. A rugosidade 6 mm nos cenários 3 e 8 provocou uma considerável alteração na carga entre os instantes 1,0s e 2,5s, fato este perfeitamente justificável pela troca do material e representado pela curva tracejada.

Figura 9 -Carga (m) x tempo (s) na válvula a jusante. Válvula fechando em 0,5 s



Observamos pelo gráfico exposto que, comparando os cenários 4(1ª. Ordem c/vaf f(0,5)) e 9(2ª. Ordem c/vaf f(0,5)), 5(1ª. Ordem c/vaf f(0,5)_R6) e 10(2ª. Ordem c/vaf f(0,5)_R6), as aproximações de 1ª e 2ª ordens retornaram gráficos semelhantes, isto é, curvas coincidentes. A rugosidade 6 mm nos cenários 5 e 10 provocou uma considerável alteração na carga entre os instantes 1,4s e 2,5s, fato este perfeitamente justificável pela troca do material e representado pela tracejada.

4.2 Seção $x/L = 0,8$:

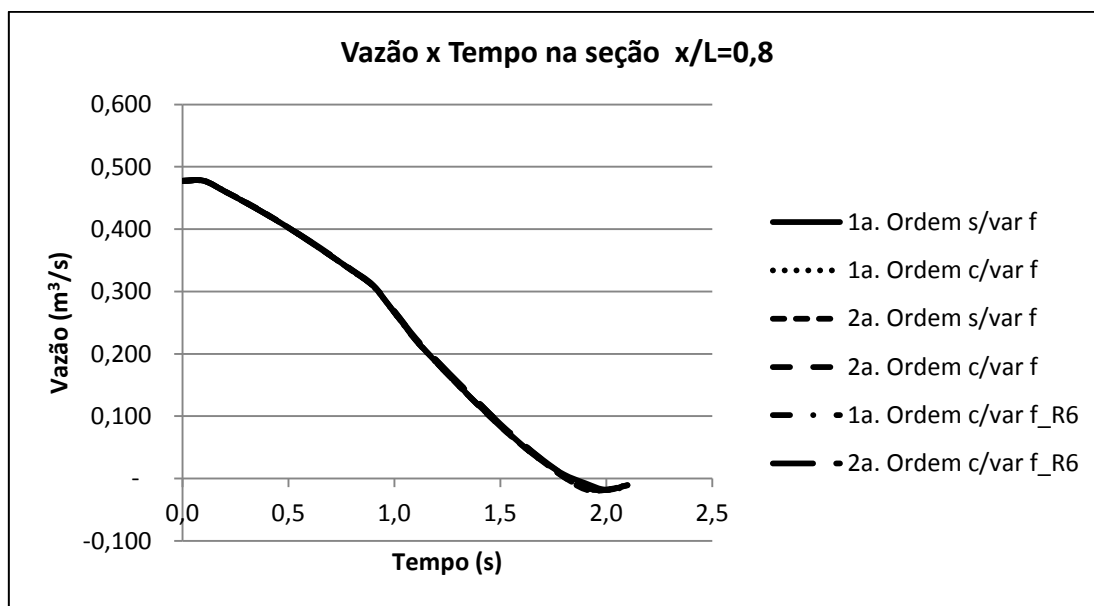
Quadro 9 - Valores de vazão ($m^3.s^{-1}$) para cenários de 1 a 5

x/L= 0,8 SEÇÃO INTERMEDIÁRIA					
Tempo(s)	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5
0,0	0,478	0,478	0,478	0,478	0,478
0,1	0,478	0,478	0,478	0,478	0,478
0,2	0,460	0,460	0,461	0,397	0,398
0,3	0,442	0,442	0,442	0,297	0,298
0,4	0,423	0,423	0,423	0,184	0,185
0,5	0,402	0,402	0,402	0,074	0,076
0,6	0,381	0,38	0,381	0,023	0,022
0,7	0,358	0,357	0,358	0,023	0,022
0,8	0,334	0,333	0,334	0,024	0,024
0,9	0,309	0,308	0,310	0,024	0,024
1,0	0,266	0,266	0,268	-0,056	-0,055
1,1	0,222	0,222	0,225	-0,154	-0,152
1,2	0,185	0,185	0,189	-0,189	-0,187
1,3	0,150	0,150	0,154	-0,198	-0,197
1,4	0,116	0,116	0,121	-0,137	-0,141
1,5	0,085	0,085	0,088	-0,030	-0,036
1,6	0,053	0,054	0,058	0,021	0,016
1,7	0,027	0,027	0,029	0,021	0,017
1,8	0,006	0,005	0,005	0,020	0,015
1,9	-0,008	-0,017	-0,013	0,020	0,015
2,0	-0,018	-0,018	-0,018	0,099	0,091
2,1	-0,010	-0,010	-0,014	0,196	0,185

Quadro 10 - Valores de vazão ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) para cenários de 6 a 10

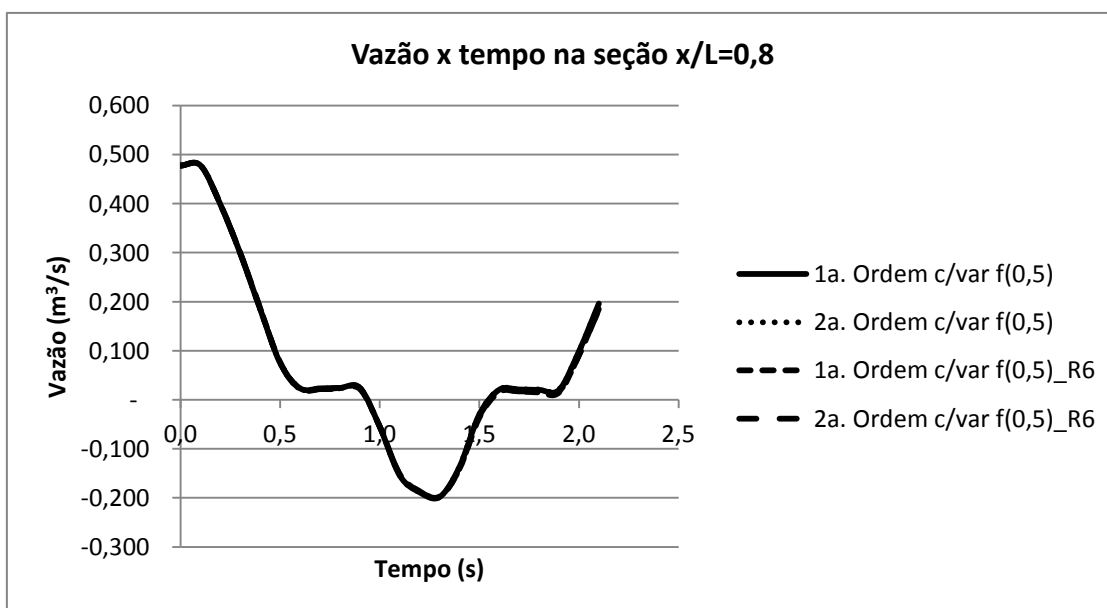
x/L= 0,8 SEÇÃO INTERMEDIÁRIA					
Tempo(s)	Cenário 6	Cenário 7	Cenário 8	Cenário 9	Cenário 10
0,0	0,478	0,478	0,478	0,478	0,478
0,1	0,478	0,478	0,477	0,478	0,477
0,2	0,460	0,460	0,460	0,397	0,398
0,3	0,443	0,442	0,442	0,297	0,298
0,4	0,424	0,423	0,423	0,184	0,186
0,5	0,402	0,402	0,403	0,074	0,074
0,6	0,380	0,380	0,381	0,023	0,022
0,7	0,357	0,357	0,358	0,023	0,022
0,8	0,333	0,333	0,335	0,023	0,022
0,9	0,308	0,308	0,310	0,023	0,022
1,0	0,266	0,266	0,268	-0,056	-0,055
1,1	0,223	0,222	0,225	-0,154	-0,152
1,2	0,186	0,185	0,189	-0,189	-0,186
1,3	0,150	0,150	0,155	-0,198	-0,199
1,4	0,116	0,116	0,121	-0,137	-0,141
1,5	0,083	0,084	0,087	-0,029	-0,033
1,6	0,054	0,054	0,057	0,021	0,017
1,7	0,027	0,027	0,030	0,021	0,017
1,8	0,002	0,002	0,006	0,021	0,017
1,9	-0,017	-0,016	-0,015	0,021	0,017
2,0	-0,018	-0,018	-0,018	0,099	0,091
2,1	-0,011	-0,010	-0,010	0,196	0,184

Figura 10 - Vazão ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) x tempo (s) na seção $x/L=0,8$. Válvula fechando em 2,1s



Observamos pelo gráfico exposto que, comparando os cenários 1(1ª Ordem s/vaf f) e 6(2ª. Ordem s/vaf f), 2(1ª Ordem c/vaf f) e 7(2ª. Ordem c/vaf f), 3(1ª. Ordem c/vaf f_R6) e 8(2ª. Ordem c/vaf f_R6), as aproximações de 1ª e 2ª ordem retornam gráficos semelhantes, isto é, curvas coincidentes. A alteração da rugosidade não representou grandes alterações para o comportamento da vazão.

Figura 11 - Vazão ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) x tempo (s) na seção $x/L=0,8$. Válvula fechando em 0,5s



Observamos pelo gráfico exposto que, comparando os cenários 4(1ª. Ordem c/vaf $f(0,5)$) e 9(2ª. Ordem c/vaf $f(0,5)$), 5(1ª. Ordem c/vaf $f(0,5)$ _R6) e 10(2ª. Ordem c/vaf $f(0,5)$ _R6), as aproximações de 1ª e 2ª ordem retornam gráficos semelhantes, isto é, curvas coincidentes. A alteração da rugosidade não representou grandes alterações para o comportamento da vazão.

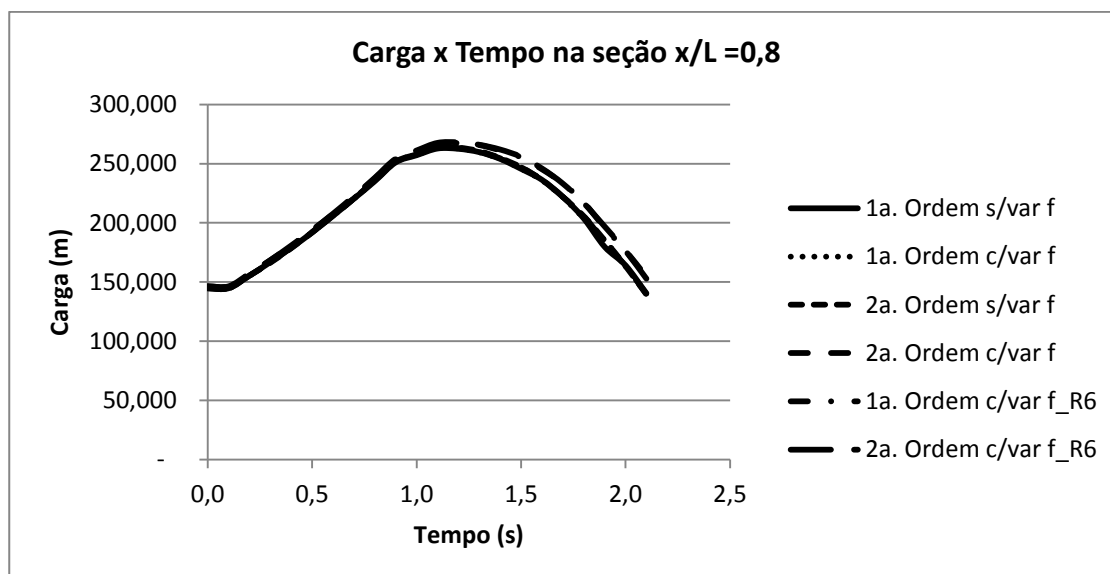
Quadro 11 - Valores de carga (m) para cenários de 1 a 5

x/L= 0,8 SEÇÃO INTERMEDIÁRIA					
Tempo(s)	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5
0,0	144,79	144,79	146,41	144,79	146,41
0,1	144,79	144,79	146,41	144,79	146,41
0,2	155,46	155,47	156,97	194,70	196,14
0,3	166,88	166,89	168,51	257,00	257,96
0,4	179,04	179,06	180,74	328,24	329,38
0,5	191,88	192,20	193,72	396,73	398,32
0,6	206,61	206,02	207,52	429,36	433,68
0,7	221,08	220,51	221,94	429,93	434,93
0,8	236,53	235,71	237,58	431,31	438,00
0,9	252,36	251,52	253,54	431,88	439,26
1,0	258,37	257,54	260,45	384,18	394,49
1,1	263,97	263,19	266,76	323,19	335,58
1,2	263,59	262,83	267,33	204,43	219,83
1,3	260,65	259,68	265,70	76,05	94,32
1,4	254,77	254,16	261,17	-25,80	-7,85
1,5	246,20	245,72	255,36	-93,36	-74,74
1,6	236,13	235,97	245,23	-125,77	-109,46
1,7	221,73	221,69	233,39	-126,48	-110,99
1,8	202,65	203,84	217,14	-128,03	-114,38
1,9	178,61	185,09	196,00	-128,52	-115,50
2,0	162,93	163,48	176,56	-81,58	-72,36
2,1	139,29	139,87	154,51	-21,38	-15,10

Quadro 12 - Valores de carga (m) para cenários de 6 a 10

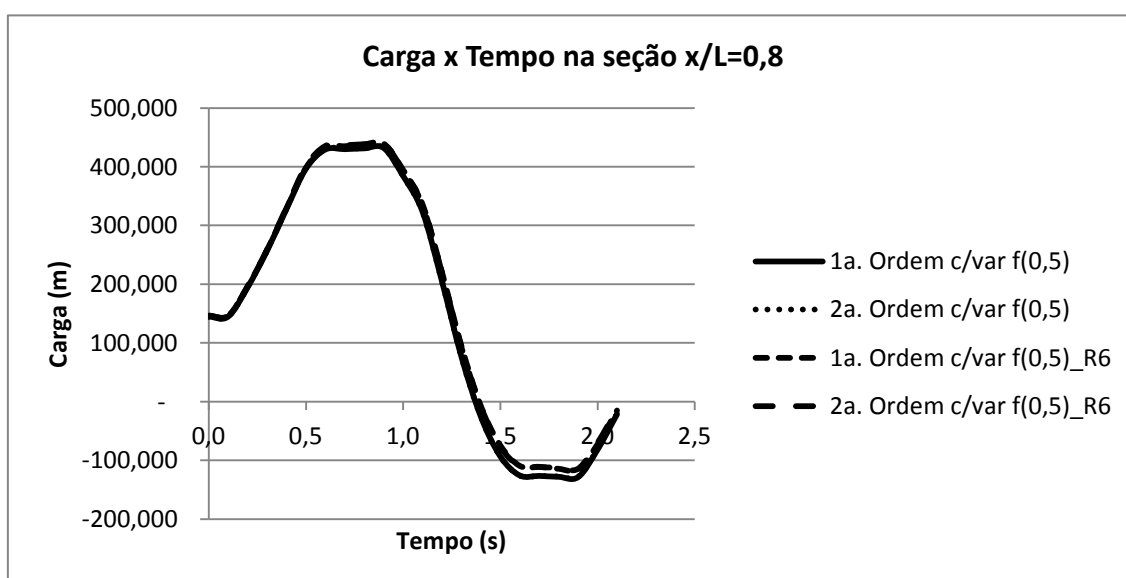
x/L= 0,8 SEÇÃO INTERMEDIÁRIA					
Tempo(s)	Cenário 6	Cenário 7	Cenário 8	Cenário 9	Cenário 10
0,0	144,79	144,79	146,41	144,79	146,41
0,1	144,79	144,79	146,41	144,79	146,41
0,2	155,49	155,49	157,14	194,9	196,43
0,3	166,38	166,95	168,55	257,42	258,96
0,4	178,65	179,14	180,92	328,87	330,60
0,5	191,99	192,31	193,94	397,49	400,95
0,6	206,13	206,18	207,78	430,12	435,39
0,7	220,64	220,70	222,58	430,70	436,67
0,8	235,88	235,95	238,11	431,44	438,29
0,9	251,72	251,80	254,17	432,01	439,57
1,0	257,75	257,84	261,13	383,66	393,48
1,1	263,91	263,50	267,56	322,66	334,35
1,2	263,55	263,16	267,99	203,87	218,91
1,3	260,57	259,98	265,95	75,33	91,83
1,4	254,76	254,46	261,92	-26,41	-9,02
1,5	246,97	246,93	255,76	-93,93	-76,88
1,6	236,20	236,18	245,90	-126,04	-110,12
1,7	221,88	221,85	233,13	-126,56	-111,26
1,8	205,63	205,58	216,66	-127,34	-112,96
1,9	185,22	184,00	196,93	-127,86	-114,11
2,0	163,49	163,42	176,38	-80,39	-69,92
2,1	139,52	139,75	152,85	-20,27	-12,69

Figura 12 - Carga (m) x tempo (s) na seção $x/L=0,8$. Válvula fechando em 2,1s



Observamos pelo gráfico exposto que, comparando os cenários 1(1ª Ordem s/vaf f) e 6(2ª. Ordem s/vaf f), 2(1ª Ordem c/vaf f) e 7(2ª. Ordem c/vaf f), 3(1ª. Ordem c/vaf f_R6) e 8(2ª. Ordem c/vaf f_R6), as aproximações de 1ª e 2ª ordens retornaram gráficos semelhantes, isto é, curvas coincidentes. A rugosidade 6 mm nos cenários 3 e 8 provocou uma considerável alteração na carga entre os instantes 1,0s e 2,5s, fato este perfeitamente justificável pela troca do material e representado pela curva tracejada.

Figura 13 - Carga (m) x tempo (s) na seção $x/L=0,8$. Válvula fechando em 0,5s



Observamos pelo gráfico exposto que, comparando os cenários 4(1ª. Ordem c/vaf f(0,5)) e 9(2ª. Ordem c/vaf f(0,5)), 5(1ª. Ordem c/vaf f(0,5)_R6) e 10(2ª. Ordem c/vaf f(0,5)_R6), as aproximações de 1ª e 2ª ordens retornaram gráficos semelhantes, isto é, curvas coincidentes. A rugosidade 6 mm nos cenários 5 e 10 provocou uma considerável alteração na carga entre os instantes 1,4s e 2,3s, fato este perfeitamente justificável pela troca do material e representado pela curva tracejada.

4.3 Seção $x/L = 0,6$:

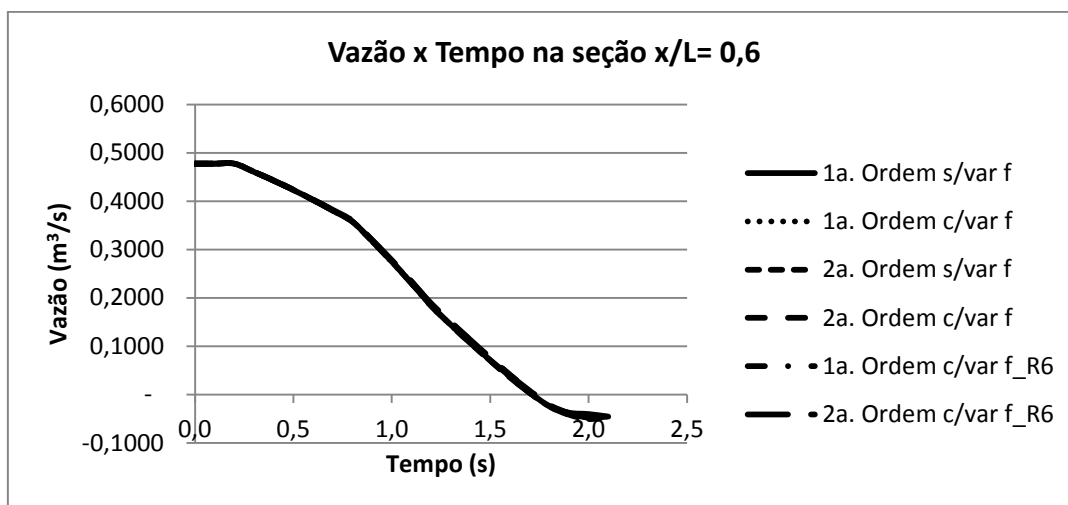
Quadro 13 - Valores de vazão ($m^3.s^{-1}$) para cenários de 1 a 5

x/L= 0,6 SEÇÃO INTERMEDIÁRIA					
Tempo(s)	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5
0,0	0,478	0,478	0,478	0,478	0,478
0,1	0,478	0,478	0,478	0,478	0,478
0,2	0,478	0,478	0,478	0,478	0,478
0,3	0,460	0,461	0,461	0,398	0,398
0,4	0,442	0,442	0,442	0,298	0,300
0,5	0,424	0,423	0,423	0,185	0,187
0,6	0,404	0,402	0,403	0,076	0,078
0,7	0,381	0,38	0,382	0,025	0,026
0,8	0,358	0,358	0,359	0,025	0,026
0,9	0,317	0,317	0,319	-0,053	-0,05
1,0	0,275	0,274	0,278	-0,152	-0,147
1,1	0,230	0,23	0,234	-0,267	-0,262
1,2	0,184	0,183	0,188	-0,375	-0,369
1,3	0,144	0,144	0,150	-0,348	-0,347
1,4	0,106	0,106	0,112	-0,250	-0,253
1,5	0,070	0,070	0,076	-0,138	-0,144
1,6	0,036	0,037	0,041	-0,031	-0,039
1,7	0,003	0,004	0,009	0,019	0,012
1,8	-0,025	-0,024	-0,022	0,019	0,012
1,9	-0,038	-0,039	-0,039	0,097	0,087
2,0	-0,041	-0,050	-0,047	0,194	0,181
2,1	-0,046	-0,045	-0,046	0,307	0,292

Quadro 14 - Valores de vazão ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) para cenários de 6 a 10

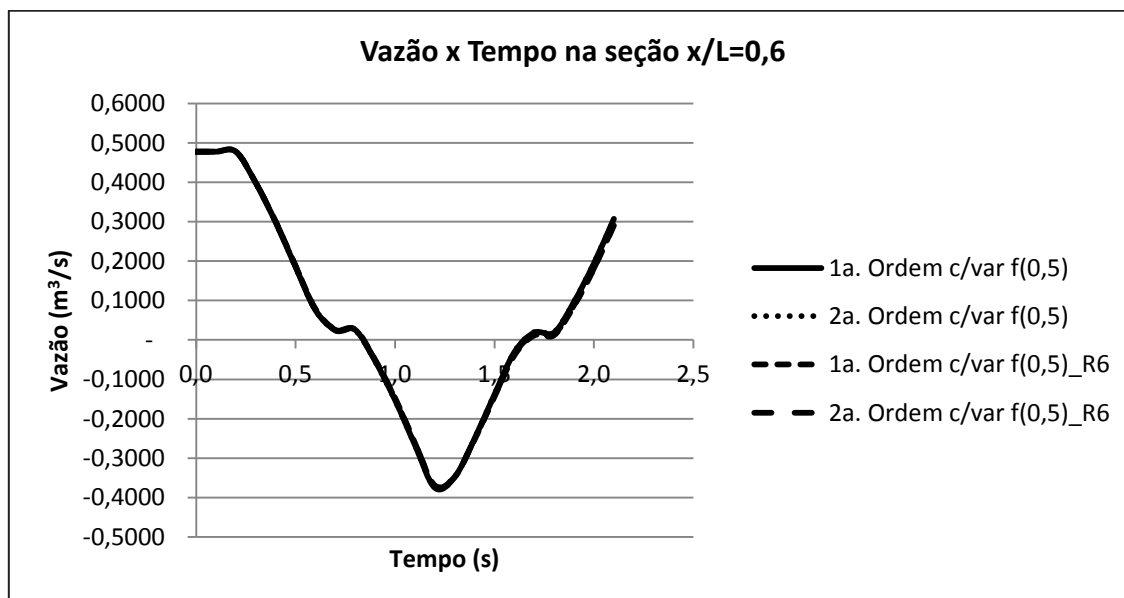
x/L= 0,6 SEÇÃO INTERMEDIÁRIA					
Tempo(s)	Cenário 6	Cenário 7	Cenário 8	Cenário 9	Cenário 10
0,0	0,478	0,478	0,478	0,478	0,478
0,1	0,478	0,478	0,477	0,478	0,477
0,2	0,478	0,478	0,477	0,478	0,477
0,3	0,460	0,461	0,461	0,398	0,399
0,4	0,443	0,442	0,443	0,298	0,300
0,5	0,424	0,423	0,423	0,185	0,188
0,6	0,403	0,402	0,403	0,076	0,077
0,7	0,380	0,381	0,382	0,024	0,024
0,8	0,358	0,358	0,359	0,024	0,024
0,9	0,317	0,317	0,32	-0,055	-0,053
1,0	0,275	0,274	0,278	-0,153	-0,150
1,1	0,231	0,230	0,234	-0,266	-0,261
1,2	0,184	0,183	0,188	-0,375	-0,370
1,3	0,144	0,144	0,150	-0,347	-0,346
1,4	0,106	0,106	0,113	-0,249	-0,251
1,5	0,070	0,070	0,076	-0,138	-0,143
1,6	0,035	0,035	0,040	-0,030	-0,036
1,7	0,004	0,003	0,008	0,020	0,015
1,8	-0,024	-0,024	-0,021	0,020	0,015
1,9	-0,042	-0,042	-0,038	0,098	0,089
2,0	-0,051	-0,048	-0,048	0,195	0,182
2,1	-0,046	-0,046	-0,046	0,306	0,290

Figura 14 - Vazão ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) x tempo (s) na seção $x/L=0,6$. Válvula fechando em 2,1s



Observamos pelo gráfico exposto que, comparando os cenários 1(1ª Ordem s/vaf f) e 6(2ª. Ordem s/vaf f), 2(1ª Ordem c/vaf f) e 7(2ª. Ordem c/vaf f), 3(1ª. Ordem c/vaf f_R6) e 8(2ª. Ordem c/vaf f_R6), as aproximações de 1ª e 2ª ordem retornam gráficos semelhantes, isto é, curvas coincidentes. A alteração da rugosidade não representou grandes alterações para o comportamento da vazão.

Figura 15 - Vazão ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) x tempo (s) na seção $x/L=0,6$. Válvula fechando em 0,5s



Observamos pelo gráfico exposto que, comparando os cenários 4(1ª. Ordem c/vaf $f(0,5)$) e 9(2ª. Ordem c/vaf $f(0,5)$), 5(1ª. Ordem c/vaf $f(0,5)$ _R6) e 10(2ª. Ordem c/vaf $f(0,5)$ _R6), as aproximações de 1ª e 2ª ordem retornam gráficos semelhantes, isto é, curvas coincidentes. A alteração da rugosidade não representou grandes alterações para o comportamento da vazão.

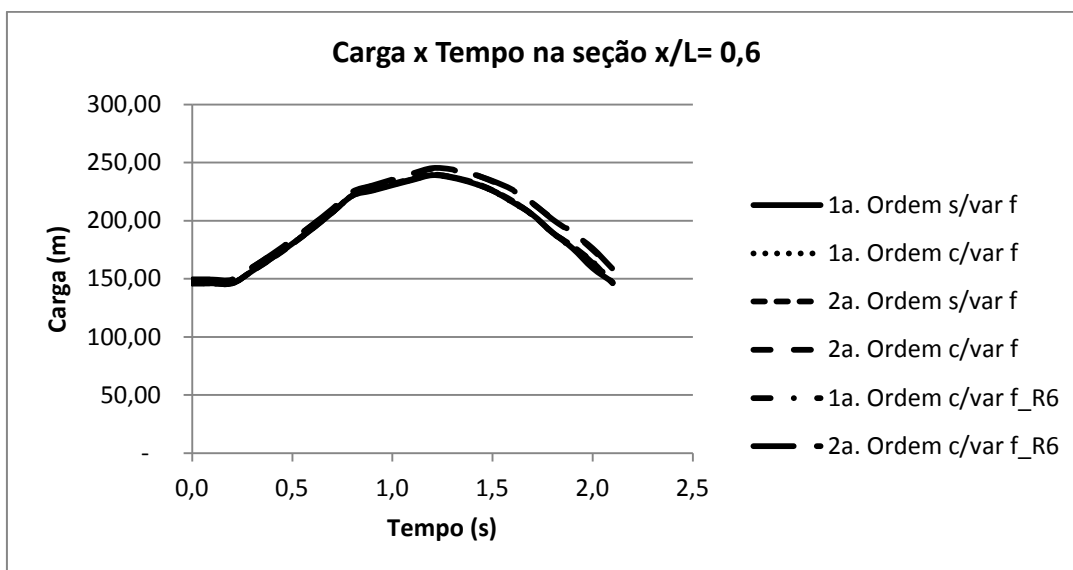
Quadro 15 - Valores de carga (m) para cenários de 1 a 5

x/L= 0,6 SEÇÃO INTERMEDIÁRIA					
Tempo(s)	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5
0,0	146,09	146,09	149,33	146,09	149,33
0,1	146,09	146,09	149,33	146,09	149,33
0,2	146,09	146,09	149,33	146,09	149,33
0,3	156,72	156,73	159,79	195,81	198,62
0,4	168,09	168,11	171,22	257,92	260,00
0,5	180,84	180,23	183,34	329,01	331,06
0,6	193,63	193,31	196,22	397,41	399,81
0,7	207,68	207,09	209,91	430,65	436,56
0,8	222,10	221,53	224,22	431,23	437,81
0,9	227,07	226,30	229,85	382,88	391,62
1,0	231,70	230,93	234,84	321,84	332,57
1,1	236,11	235,39	239,93	252,63	265,70
1,2	240,18	239,26	244,62	185,47	199,69
1,3	237,81	237,19	243,46	104,98	119,30
1,4	233,17	232,61	240,25	43,54	59,36
1,5	225,87	225,64	233,73	-26,82	-10,09
1,6	215,88	215,79	226,20	-94,13	-76,45
1,7	204,79	204,79	214,77	-127,05	-112,26
1,8	189,42	189,47	201,57	-127,75	-113,80
1,9	175,13	176,40	189,76	-80,27	-69,51
2,0	158,11	164,66	174,91	-19,99	-12,081
2,1	145,97	146,50	158,85	48,29	52,85

Quadro 16 - Valores de carga (m) para cenários de 6 a 10

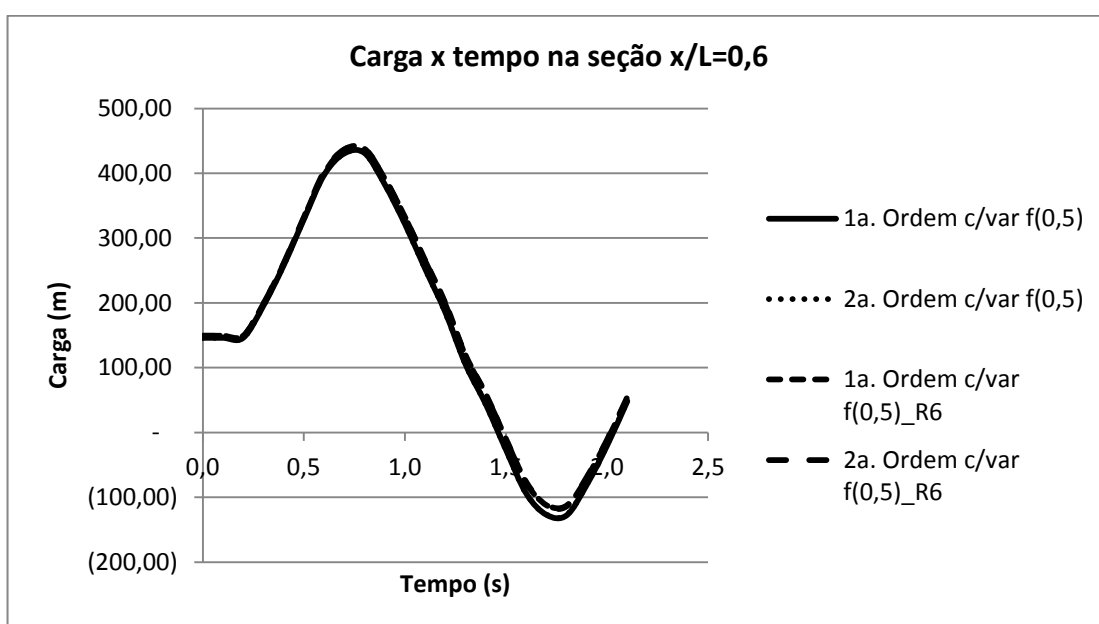
x/L= 0,6 SEÇÃO INTERMEDIÁRIA H x t					
Tempo(s)	Cenário 6	Cenário 7	Cenário 8	Cenário 9	Cenário 10
0,0	146,09	146,09	149,33	146,09	149,33
0,1	146,09	146,09	149,33	146,09	149,33
0,2	146,09	146,09	149,33	146,09	149,33
0,3	156,75	156,75	159,96	196,01	198,91
0,4	167,60	168,17	171,26	258,33	261,00
0,5	179,82	180,31	183,53	329,63	332,28
0,6	193,10	193,43	196,44	398,17	402,45
0,7	207,19	207,24	210,17	430,78	436,85
0,8	221,65	221,72	224,86	431,36	438,13
0,9	226,44	226,51	230,22	382,99	392,02
1,0	231,62	231,15	235,42	321,94	332,76
1,1	236,03	235,63	240,59	252,10	264,72
1,2	239,69	239,52	245,24	184,89	197,51
1,3	237,40	237,44	244,05	104,51	118,36
1,4	233,17	232,84	240,09	43,17	58,47
1,5	226,17	225,85	234,21	-27,12	-10,57
1,6	216,97	216,91	226,61	-94,58	-78,31
1,7	204,94	204,91	215,13	-126,68	-111,54
1,8	189,64	189,54	201,10	-127,21	-112,68
1,9	178,12	178,06	189,28	-79,71	-68,44
2,0	164,33	163,53	176,20	-19,51	-11,05
2,1	146,13	146,40	158,51	49,30	54,80

Figura 16 - Carga (m) x tempo (s) na seção $x/L=0,6$. Válvula fechando em 2,1s



Observamos pelo gráfico exposto que, comparando os cenários 1(1ª Ordem s/vaf f) e 6(2ª. Ordem s/vaf f), 2(1ª Ordem c/vaf f) e 7(2ª. Ordem c/vaf f), 3(1ª. Ordem c/vaf f_R6) e 8(2ª. Ordem c/vaf f_R6), as aproximações de 1ª e 2ª ordens retornaram gráficos semelhantes, isto é, curvas coincidentes. A rugosidade 6 mm nos cenários 3 e 8 provocou uma considerável alteração na carga entre os instantes 1,0s e 2,5s, fato este perfeitamente justificável pela troca do material e representado pela curva tracejada.

Figura 17 - Carga (m) x tempo (s) na seção $x/L=0,6$. Válvula fechando em 0,5s



Observamos pelo gráfico exposto que, comparando os cenários 4(1ª. Ordem c/vaf f(0,5)) e 9(2ª. Ordem c/vaf f(0,5)), 5(1ª. Ordem c/vaf f(0,5)_R6) e 10(2ª. Ordem c/vaf f(0,5)_R6), as aproximações de 1ª e 2ª ordens retornaram gráficos semelhantes, isto é, curvas coincidentes. A rugosidade 6 mm nos cenários 5 e 10 provocou uma considerável alteração na carga entre os instantes 1,4s e 2,3s, fato este perfeitamente justificável pela troca do material e representado pela curva tracejada.

4.4 Seção $x/L = 0,4$:

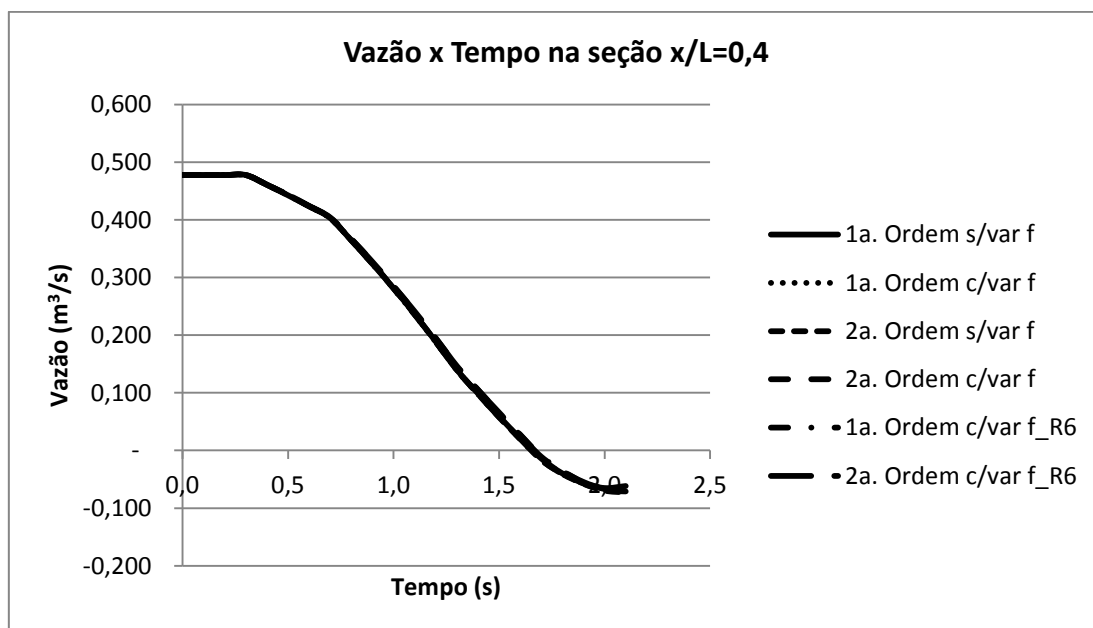
Quadro 17 - Valores de vazão ($m^3.s^{-1}$) para cenários de 1 a 5

X/L= 0,4 SEÇÃO INTERMEDIÁRIA					
Tempo(s)	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5
0,0	0,478	0,478	0,478	0,478	0,478
0,1	0,478	0,478	0,478	0,478	0,478
0,2	0,478	0,478	0,478	0,478	0,478
0,3	0,478	0,478	0,478	0,478	0,478
0,4	0,462	0,461	0,461	0,398	0,399
0,5	0,443	0,442	0,443	0,299	0,301
0,6	0,424	0,423	0,424	0,187	0,191
0,7	0,404	0,403	0,404	0,078	0,083
0,8	0,365	0,364	0,366	-0,052	-0,048
0,9	0,324	0,323	0,327	-0,151	-0,145
1,0	0,281	0,281	0,285	-0,265	-0,258
1,1	0,236	0,235	0,241	-0,374	-0,366
1,2	0,188	0,188	0,194	-0,426	-0,423
1,3	0,139	0,139	0,147	-0,427	-0,424
1,4	0,097	0,098	0,105	-0,349	-0,349
1,5	0,057	0,058	0,065	-0,251	-0,255
1,6	0,019	0,020	0,027	-0,140	-0,148
1,7	-0,016	-0,015	-0,010	-0,033	-0,043
1,8	-0,041	-0,040	-0,035	0,095	0,084
1,9	-0,058	-0,057	-0,056	0,193	0,179
2,0	-0,065	-0,066	-0,067	0,306	0,289
2,1	-0,061	-0,071	-0,071	0,413	0,393

Quadro 18 - Valores de vazão ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) para cenários de 6 a 10

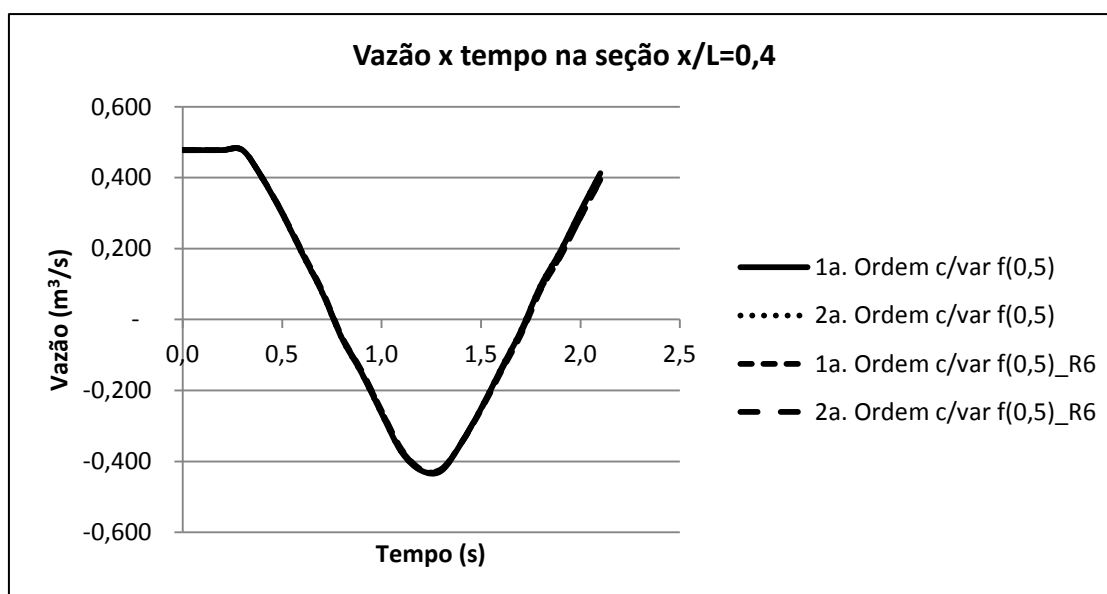
X/L= 0,4 SEÇÃO INTERMEDIÁRIA					
Tempo(s)	Cenário 6	Cenário 7	Cenário 8	Cenário 9	Cenário 10
0,0	0,478	0,478	0,478	0,478	0,478
0,1	0,478	0,478	0,477	0,478	0,477
0,2	0,478	0,478	0,477	0,478	0,477
0,3	0,478	0,478	0,477	0,478	0,477
0,4	0,461	0,461	0,461	0,398	0,399
0,5	0,443	0,443	0,443	0,299	0,301
0,6	0,424	0,423	0,424	0,186	0,189
0,7	0,403	0,403	0,404	0,077	0,079
0,8	0,364	0,364	0,367	-0,053	-0,050
0,9	0,324	0,324	0,327	-0,152	-0,148
1,0	0,281	0,281	0,285	-0,266	-0,259
1,1	0,236	0,235	0,241	-0,374	-0,369
1,2	0,188	0,188	0,195	-0,425	-0,421
1,3	0,139	0,139	0,146	-0,426	-0,422
1,4	0,098	0,098	0,105	-0,348	-0,347
1,5	0,058	0,058	0,066	-0,250	-0,253
1,6	0,020	0,020	0,027	-0,139	-0,145
1,7	-0,016	-0,017	-0,011	-0,031	-0,038
1,8	-0,041	-0,041	-0,036	0,097	0,086
1,9	-0,058	-0,057	-0,055	0,194	0,180
2,0	-0,070	-0,069	-0,067	0,306	0,289
2,1	-0,073	-0,071	-0,073	0,413	0,394

Figura 18 - Vazão ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) x tempo (s) na seção $x/L=0,4$. Válvula fechando em 2,1s



Observamos pelo gráfico exposto que, comparando os cenários 1(1ª Ordem s/vaf f) e 6(2ª. Ordem s/vaf f), 2(1ª Ordem c/vaf f) e 7(2ª. Ordem c/vaf f), 3(1ª. Ordem c/vaf f_R6) e 8(2ª. Ordem c/vaf f_R6), as aproximações de 1ª e 2ª ordem retornam gráficos semelhantes, isto é, curvas coincidentes. A alteração da rugosidade não representou grandes alterações para o comportamento da vazão.

Figura 19 - Vazão ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) x tempo (s) na seção $x/L=0,4$. Válvula fechando em 0,5s



Observamos pelo gráfico exposto que, comparando os cenários 4(1ª. Ordem c/vaf $f(0,5)$) e 9(2ª. Ordem c/vaf $f(0,5)$), 5(1ª. Ordem c/vaf $f(0,5)$ _R6) e 10(2ª. Ordem c/vaf $f(0,5)$ _R6), as aproximações de 1ª e 2ª ordem retornam gráficos semelhantes, isto é, curvas coincidentes. A alteração da rugosidade não representou grandes alterações para o comportamento da vazão.

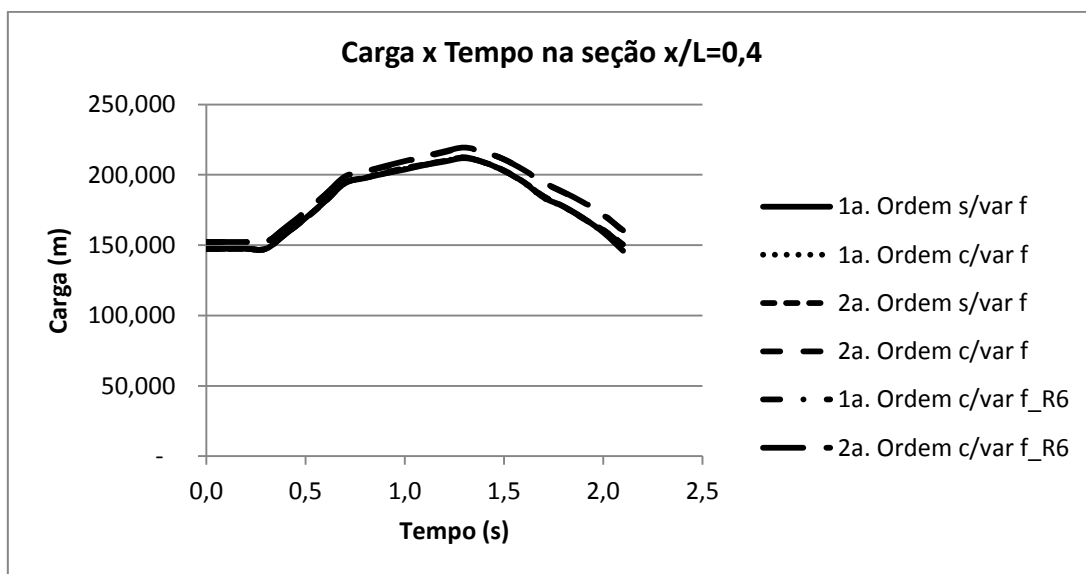
Quadro 19 - Valores de carga (m) para os cenários de 1 a 5

x/L= 0,4 SEÇÃO INTERMEDIÁRIA					
Tempo(s)	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5
0,0	147,39	147,39	152,26	147,39	152,26
0,1	147,39	147,39	152,26	147,39	152,26
0,2	147,39	147,39	152,26	147,39	152,26
0,3	147,40	147,40	152,26	147,40	152,26
0,4	158,63	157,99	162,62	196,92	201,39
0,5	169,94	169,32	173,94	258,83	263,04
0,6	182,01	181,39	185,95	330,40	333,96
0,7	194,75	194,43	198,72	398,72	403,94
0,8	198,29	197,74	202,33	382,21	390,56
0,9	201,47	200,96	205,59	321,11	331,17
1,0	204,84	204,17	209,38	251,14	262,84
1,1	207,93	207,02	212,74	183,79	195,19
1,2	210,33	209,74	216,08	152,77	163,26
1,3	212,69	212,18	219,15	152,57	163,26
1,4	208,90	208,65	216,00	103,67	116,16
1,5	202,84	202,66	211,07	42,59	56,64
1,6	194,52	194,45	203,25	-28,15	-12,13
1,7	183,56	183,57	194,38	-95,41	-79,75
1,8	177,26	177,34	187,39	-79,27	-66,96
1,9	168,91	169,04	180,45	-19,11	-9,41
2,0	158,15	159,41	172,03	49,83	56,76
2,1	145,08	151,55	159,80	116,15	122,11

Quadro 20 - Valores de carga (m) para os cenários de 6 a 10

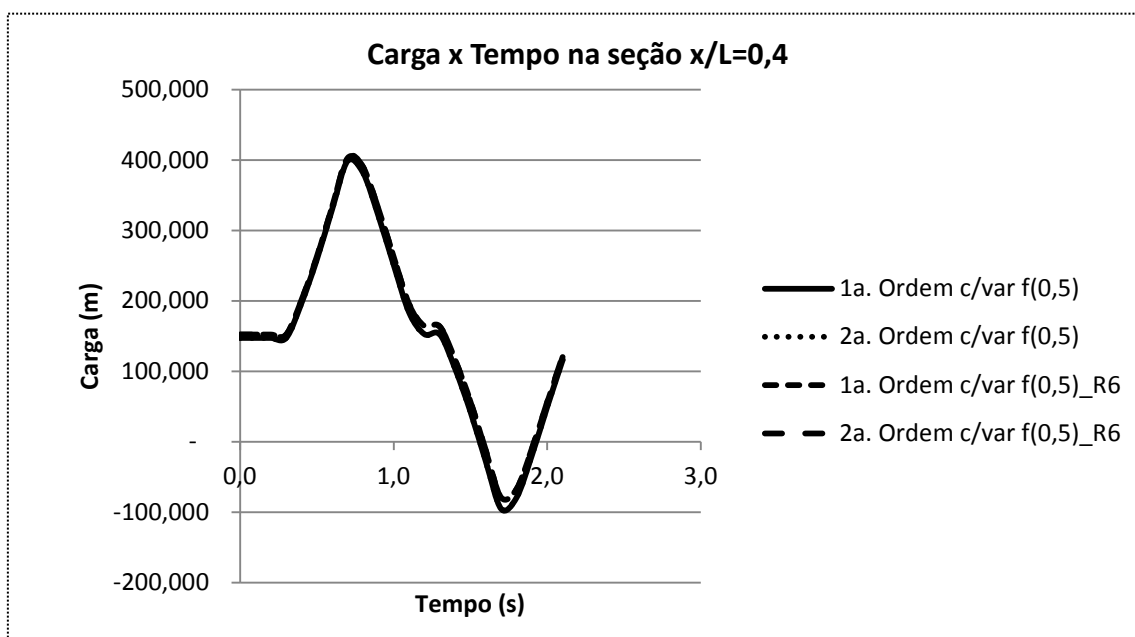
x/L= 0,4 SEÇÃO INTERMEDIÁRIA					
Tempo(s)	Cenário 6	Cenário 7	Cenário 8	Cenário 9	Cenário 10
0,0	147,39	147,39	152,26	147,39	152,26
0,1	147,39	147,39	152,26	147,39	152,26
0,2	147,39	147,39	152,26	147,39	152,26
0,3	147,40	147,40	152,26	147,40	152,26
0,4	158,01	158,01	162,78	197,12	201,39
0,5	168,81	169,38	173,98	259,25	263,04
0,6	180,98	181,48	186,14	330,39	333,96
0,7	194,22	194,55	198,95	398,84	403,94
0,8	197,82	197,87	202,42	382,32	390,56
0,9	201,59	201,09	206,18	321,21	331,17
1,0	204,74	204,32	209,73	251,24	262,84
1,1	207,42	207,18	213,15	183,84	195,19
1,2	209,87	209,91	216,66	152,33	163,26
1,3	212,28	212,36	219,36	152,33	163,26
1,4	208,79	208,81	216,31	103,52	116,16
1,5	203,16	202,81	210,92	42,34	56,64
1,6	194,91	194,57	203,42	-27,83	-12,13
1,7	184,72	184,59	194,57	-95,23	-79,75
1,8	177,42	177,39	187,74	-79,02	-66,96
1,9	168,74	169,06	180,35	-18,75	-9,41
2,0	160,75	161,03	171,38	50,22	56,76
2,1	150,53	149,44	160,53	116,58	122,11

Figura 20 - Carga (m) x tempo (s) na seção $x/L=0,4$. Válvula fechando em 2,1s



Observamos pelo gráfico exposto que, comparando os cenários 1(1ª Ordem s/vaf f) e 6(2ª. Ordem s/vaf f), 2(1ª Ordem c/vaf f) e 7(2ª. Ordem c/vaf f), 3(1ª. Ordem c/vaf f_R6) e 8(2ª. Ordem c/vaf f_R6), as aproximações de 1ª e 2ª ordens retornaram gráficos semelhantes, isto é, curvas coincidentes. A rugosidade 6 mm nos cenários 3 e 8 provocou uma considerável alteração na carga entre os instantes 1,0s e 2,5s, fato este perfeitamente justificável pela troca do material e representado pela curva tracejada.

Figura 21 - Carga (m) x tempo (s) na seção $x/L=0,4$. Válvula fechando em 0,5s



Observamos pelo gráfico exposto que, comparando os cenários 4(1ª. Ordem c/vaf f(0,5)) e 9(2ª. Ordem c/vaf f(0,5)), 5(1ª. Ordem c/vaf f(0,5)_R6) e 10(2ª. Ordem c/vaf f(0,5)_R6), as aproximações de 1ª e 2ª ordens retornaram gráficos semelhantes, isto é, curvas coincidentes. A rugosidade 6 mm nos cenários 5 e 10 provocou uma considerável alteração na carga entre os instantes 1,4s e 2,3s, fato este perfeitamente justificável pela troca do material e representado pela curva tracejada.

4.5 Seção $x/L = 0,2$:

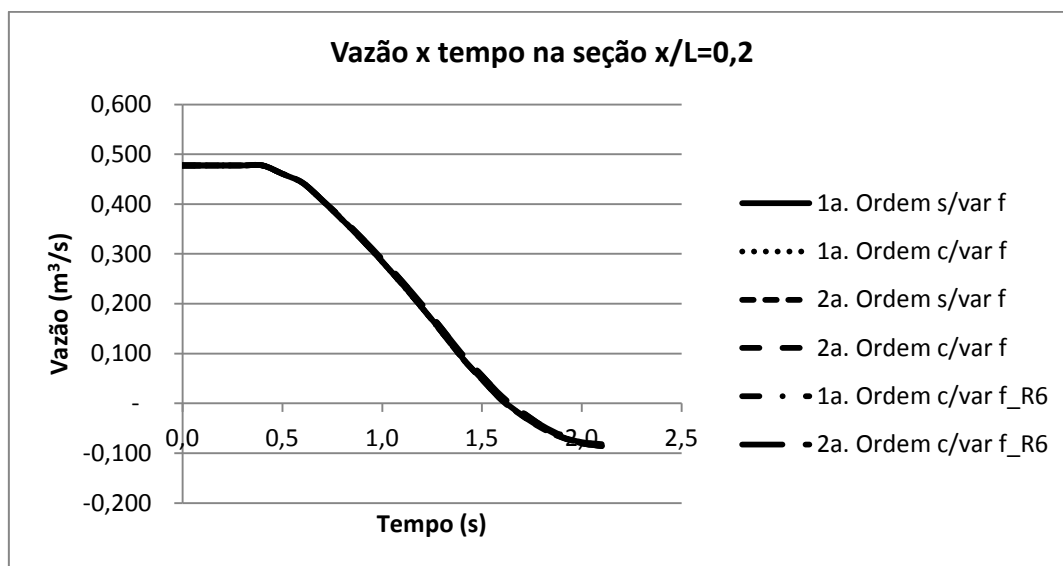
Quadro 21 - Valores de vazão ($m^3 \cdot s^{-1}$) para os cenários de 1 a 5

x/L= 0,2 SEÇÃO INTERMEDIÁRIA					
Tempo(s)	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5
0,0	0,478	0,478	0,478	0,478	0,478
0,1	0,478	0,478	0,478	0,478	0,478
0,2	0,478	0,478	0,478	0,478	0,478
0,3	0,479	0,478	0,478	0,478	0,478
0,4	0,479	0,478	0,478	0,478	0,478
0,5	0,462	0,461	0,461	0,399	0,402
0,6	0,444	0,443	0,443	0,300	0,305
0,7	0,408	0,407	0,408	0,109	0,116
0,8	0,369	0,368	0,370	-0,099	-0,089
0,9	0,328	0,327	0,331	-0,264	-0,256
1,0	0,285	0,284	0,289	-0,373	-0,365
1,1	0,239	0,239	0,245	-0,425	-0,420
1,2	0,191	0,191	0,198	-0,425	-0,421
1,3	0,141	0,142	0,150	-0,427	-0,425
1,4	0,090	0,091	0,099	-0,427	-0,425
1,5	0,047	0,048	0,056	-0,350	-0,353
1,6	0,005	0,006	0,014	-0,253	-0,259
1,7	-0,025	-0,024	-0,017	-0,063	-0,076
1,8	-0,049	-0,048	-0,044	0,141	0,123
1,9	-0,069	-0,068	-0,064	0,304	0,286
2,0	-0,079	-0,078	-0,080	0,412	0,392
2,1	-0,082	-0,083	-0,086	0,463	0,446

Quadro 22 - Valores de vazão ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) para simulações de 6 a 10

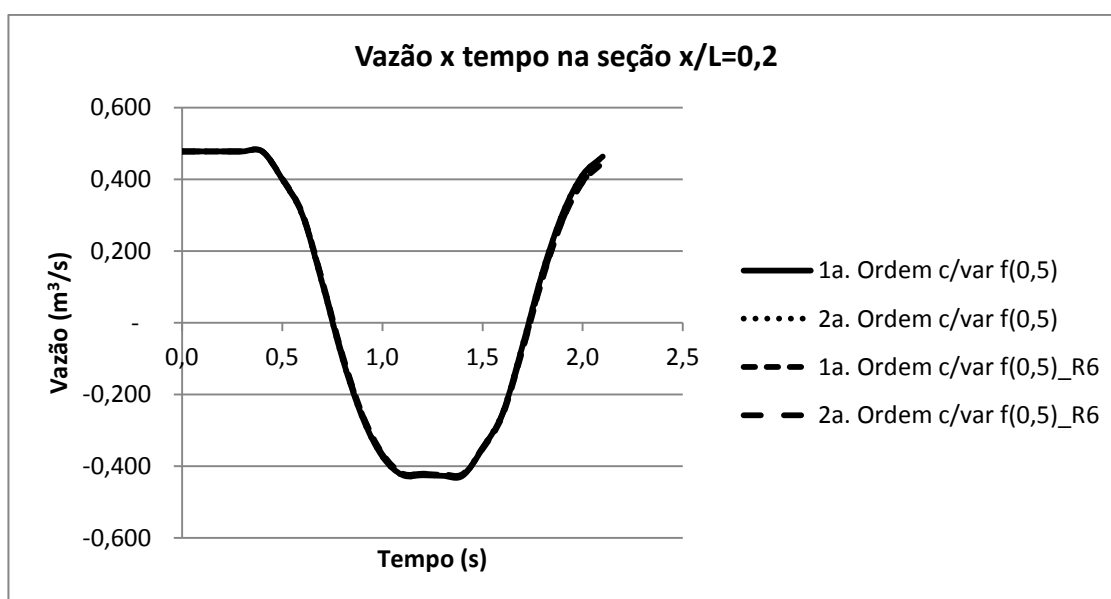
x/L= 0,2 SEÇÃO INTERMEDIÁRIA					
Tempo(s)	Cenário 6	Cenário 7	Cenário 8	Cenário 9	Cenário 10
0,0	0,478	0,478	0,478	0,478	0,478
0,1	0,478	0,478	0,478	0,478	0,478
0,2	0,478	0,478	0,478	0,478	0,478
0,3	0,478	0,478	0,478	0,478	0,478
0,4	0,478	0,478	0,478	0,478	0,478
0,5	0,461	0,461	0,461	0,399	0,400
0,6	0,443	0,443	0,443	0,300	0,303
0,7	0,408	0,407	0,408	0,108	0,115
0,8	0,369	0,368	0,371	-0,100	-0,093
0,9	0,328	0,328	0,331	-0,265	-0,258
1,0	0,285	0,284	0,289	-0,374	-0,368
1,1	0,239	0,239	0,245	-0,425	-0,421
1,2	0,191	0,191	0,198	-0,425	-0,421
1,3	0,142	0,142	0,150	-0,426	-0,422
1,4	0,091	0,091	0,099	-0,426	-0,422
1,5	0,048	0,047	0,056	-0,348	-0,348
1,6	0,006	0,006	0,0142	-0,251	-0,254
1,7	-0,025	-0,024	-0,017	-0,062	-0,073
1,8	-0,050	-0,049	-0,044	0,143	0,128
1,9	-0,069	-0,068	-0,065	0,305	0,287
2,0	-0,080	-0,080	-0,080	0,412	0,394
2,1	-0,086	-0,086	-0,086	0,463	0,444

Figura 22 - Vazão ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) x tempo (s) na seção $x/L = 0,2$. Válvula fechando em 2,1s



Observamos pelo gráfico exposto que, comparando os cenários 1(1ª Ordem s/vaf f) e 6(2ª. Ordem s/vaf f), 2(1ª Ordem c/vaf f) e 7(2ª. Ordem c/vaf f), 3(1ª. Ordem c/vaf f_R6) e 8(2ª. Ordem c/vaf f_R6), as aproximações de 1ª e 2ª ordem retornam gráficos semelhantes, isto é, curvas coincidentes. A alteração da rugosidade não representou grandes alterações para o comportamento da vazão.

Figura 23 - Vazão ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) x tempo (s) na seção $x/L = 0,2$. Válvula fechando em 0,5s



Observamos pelo gráfico exposto que, comparando os cenários 4(1ª. Ordem c/vaf $f(0,5)$) e 9(2ª. Ordem c/vaf $f(0,5)$), 5(1ª. Ordem c/vaf $f(0,5)$ _R6) e 10(2ª. Ordem c/vaf $f(0,5)$ _R6), as aproximações de 1ª e 2ª ordem retornam gráficos semelhantes, isto é, curvas coincidentes. A alteração da rugosidade não representou grandes alterações para o comportamento da vazão.

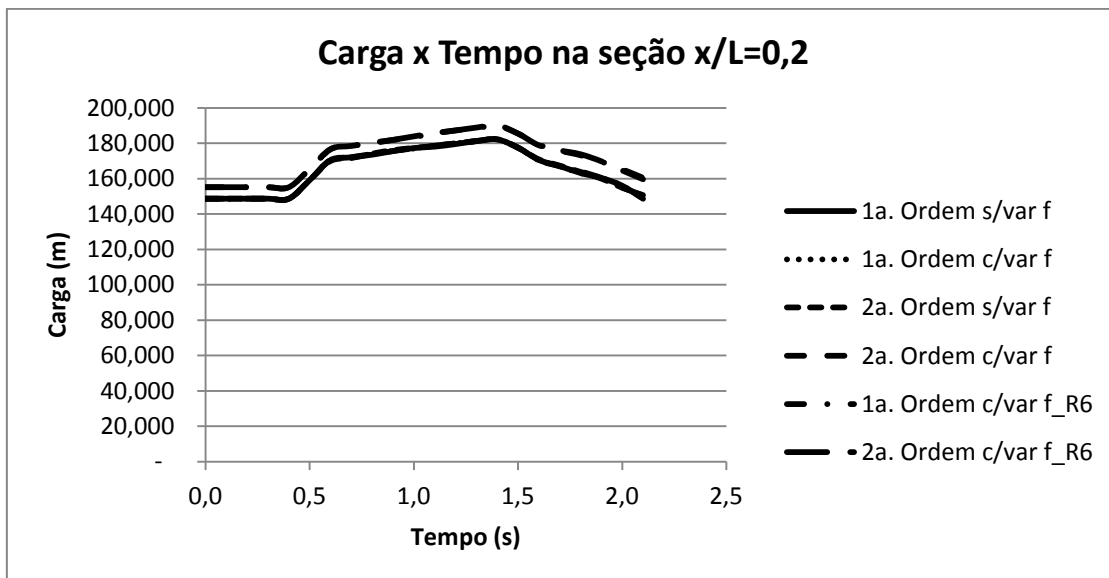
Quadro 23 - Valores de carga (m) para os cenários de 1 a 5

x/L= 0,2 SEÇÃO INTERMEDIÁRIA					
Tempo(s)	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5
0,0	148,69	148,69	155,18	148,69	155,18
0,1	148,69	148,69	155,18	148,69	155,18
0,2	148,70	148,70	155,18	148,70	155,18
0,3	149,34	148,70	155,18	148,70	155,18
0,4	149,34	148,70	155,18	148,70	155,18
0,5	159,89	159,24	165,44	198,67	205,02
0,6	171,16	170,53	176,66	260,38	265,52
0,7	172,68	172,10	178,50	281,99	287,84
0,8	174,14	173,89	180,14	288,57	295,86
0,9	176,07	175,63	181,91	250,28	260,55
1,0	177,71	177,07	183,53	182,74	193,67
1,1	179,07	178,54	185,56	150,97	160,26
1,2	180,44	179,95	187,30	150,77	159,84
1,3	181,42	181,20	188,61	151,28	160,96
1,4	182,35	182,23	189,95	151,28	160,95
1,5	177,54	177,45	185,50	102,04	112,79
1,6	170,52	170,44	179,24	41,13	54,00
1,7	166,99	167,00	175,86	19,62	31,85
1,8	163,04	163,13	173,25	13,29	24,45
1,9	160,27	160,34	169,64	51,07	58,82
2,0	155,86	155,91	165,32	117,4	123,06
2,1	147,87	149,08	160,52	148,68	155,26

Quadro 24 - Valores de carga (m) para os cenários de 6 a 10

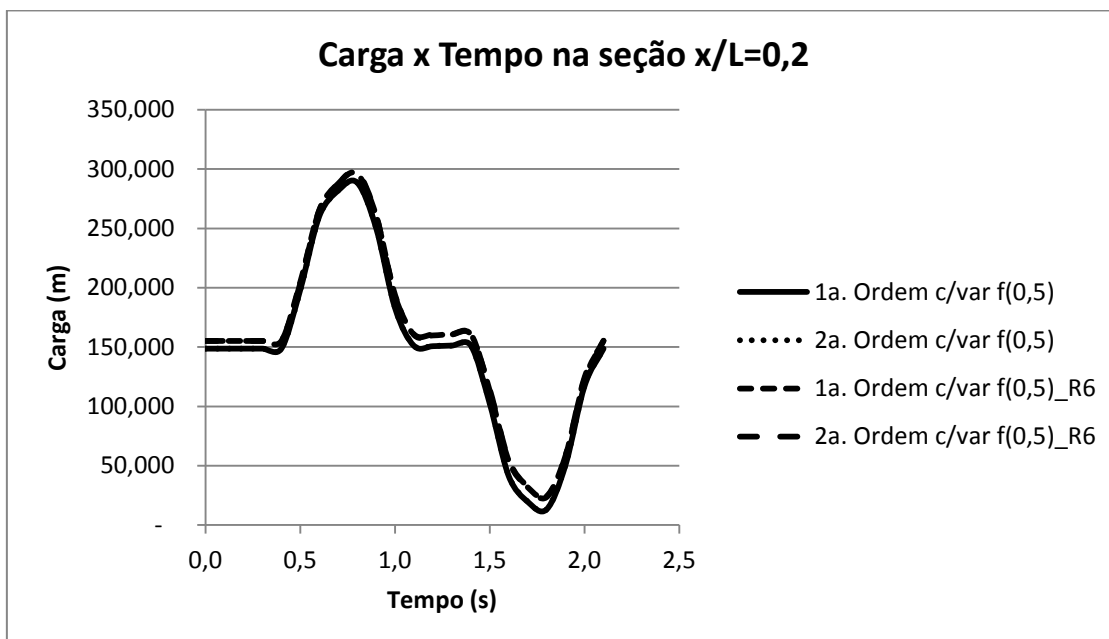
x/L= 0,2 SEÇÃO INTERMEDIÁRIA					
Tempo(s)	Cenário 6	Cenário 7	Cenário 8	Cenário 9	Cenário 10
0,0	148,69	148,69	155,18	148,69	155,18
0,1	148,69	148,69	155,18	148,69	155,18
0,2	148,70	148,70	155,18	148,70	155,18
0,3	148,70	148,70	155,18	148,70	155,18
0,4	148,70	148,70	155,18	148,70	155,18
0,5	159,26	159,27	165,61	198,23	203,88
0,6	170,02	170,60	176,71	260,16	265,08
0,7	171,67	172,16	178,52	281,97	287,75
0,8	174,18	173,94	180,32	288,66	296,90
0,9	176,13	175,70	181,98	250,38	260,97
1,0	177,40	177,14	183,95	182,79	192,88
1,1	178,60	178,62	185,84	151,17	160,68
1,2	180,02	180,04	187,29	151,16	160,68
1,3	181,27	181,29	188,92	151,16	160,69
1,4	182,26	182,32	190,17	151,16	160,69
1,5	177,53	177,53	185,51	102,52	113,96
1,6	170,91	170,49	178,87	41,51	54,80
1,7	167,38	167,04	176,03	19,81	32,38
1,8	163,82	164,11	173,82	13,28	23,63
1,9	160,04	160,35	169,83	51,14	58,71
2,0	154,93	154,96	164,65	117,71	124,53
2,1	150,71	150,69	159,68	148,74	155,43

Figura 24 - Carga (m) x tempo (s) na seção $x/L=0,2$. Válvula fechando em 2,1s



Observamos pelo gráfico exposto que, comparando os cenários 1(1ª Ordem s/vaf f) e 6(2ª. Ordem s/vaf f), 2(1ª Ordem c/vaf f) e 7(2ª. Ordem c/vaf f), 3(1ª. Ordem c/vaf f_R6) e 8(2ª. Ordem c/vaf f_R6), as aproximações de 1ª e 2ª ordens retornaram gráficos semelhantes, isto é, curvas coincidentes. A rugosidade 6 mm nos cenários 3 e 8 provocou uma considerável alteração na carga entre os instantes 0s e 2,1s, fato este perfeitamente justificável pela troca do material e representado pela curva tracejada.

Figura 25 - Carga (m) x tempo (s) na seção $x/L=0,2$. Válvula fechando em 0,5s



Observamos pelo gráfico exposto que, comparando os cenários 4(1ª. Ordem c/vaf $f(0,5)$) e 9(2ª. Ordem c/vaf $f(0,5)$), 5(1ª. Ordem c/vaf $f(0,5)$ _R6) e 10(2ª. Ordem c/vaf $f(0,5)$ _R6), as aproximações de 1ª e 2ª ordens retornaram gráficos semelhantes, isto é, curvas coincidentes. A rugosidade 6 mm nos cenários 5 e 10 provocou uma considerável alteração na carga entre os instantes 0s e 2,1s, fato este perfeitamente justificável pela troca do material e representado pela curva tracejada.

Para tubulação com diâmetros D1 e D2 temos os cenários de 1 a 6 para a seção intermediária e válvula a jusante:

Quadro 25 –Cenários de 1 a 6 para tubulação com diâmetros D1 e D2

CENÁRIO	DESCRIÇÃO
1	Aproximação de 1ª ordem com variação de f , válvula fechando em 6s, rugosidade = 0,0039 para TUBO 1 e 0,0029 para TUBO 2.
2	Aproximação de 1ª ordem com variação de f , válvula fechando em 0,5s, rugosidade = 0,0039 para TUBO 1 e 0,0029 para TUBO 2.
3	Aproximação de 1ª ordem com variação de f , válvula fechando em 6s, rugosidade = 6,0000 para TUBO 1 e TUBO 2.
4	Aproximação de 2ª. ordem com variação de f , válvula fechando em 6s, rugosidade = 0,0039 para TUBO 1 e 0,0029 para TUBO 2.
5	Aproximação de 2ª ordem com variação de f , válvula fechando em 0,5s, rugosidade = 0,0039 para TUBO 1 e 0,0029 para TUBO 2.
6	Aproximação de 2ª. ordem com variação de f , válvula fechando em 6s, rugosidade = 6,0000 para TUBO 1 e TUBO 2.

Para as figuras de 11 a 14 entenda-se a legenda:

1ª. Ordem c/vaf f : Cenário 1

1ª. Ordem c/vaf $f(0,5)$: Cenário 2

1ª. Ordem c/vaf f _R6: Cenário 3

2ª. Ordem c/vaf f : Cenário 4

2ª. Ordem c/vaf $f(0,5)$: Cenário 5

2ª. Ordem c/vaf f _R6: Cenário 6

Em todas os cenários a condição de Courant-Friedrich-Lewy é satisfeita.

Numero de Courant : $C_n = (a.\Delta t)/(\Delta x)$.

Condição de Courant: $\Delta x \geq a.\Delta t$

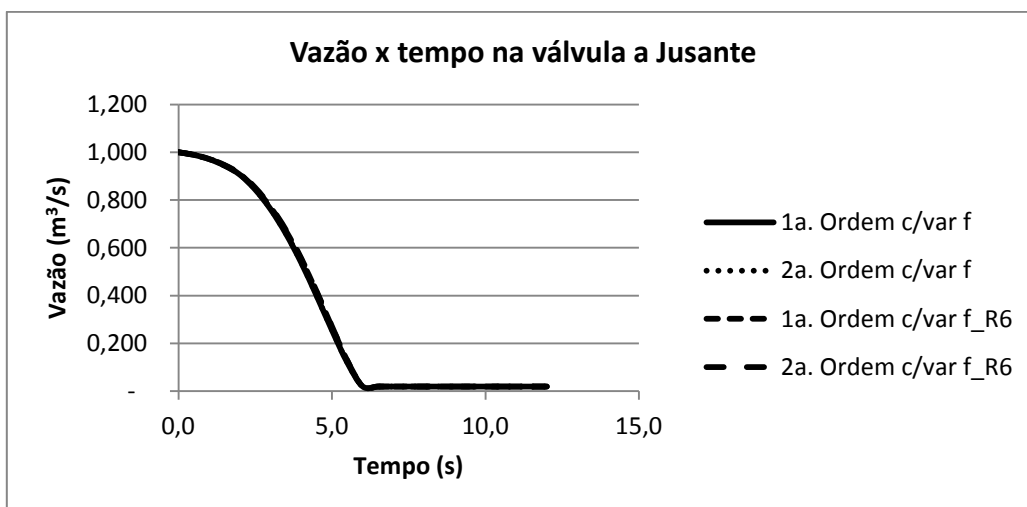
Encontrou-se os seguintes resultados:

4.6 Válvula a Jusante:

Quadro 26- Valores de vazão ($m^3.s^{-1}$) para cenários de 1 a 6

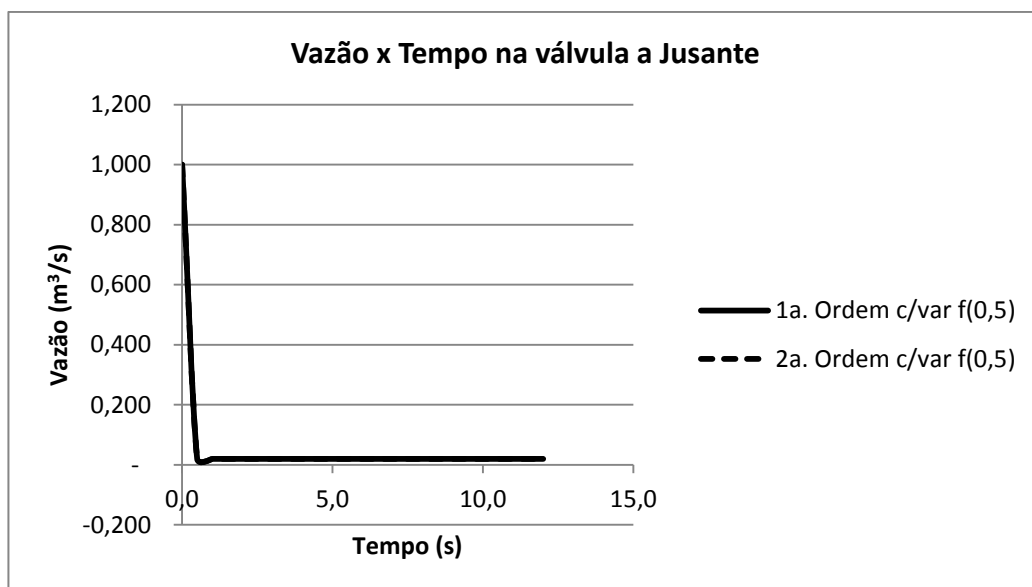
VALVULA A JUSANTE						
Tempo(s)	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5	Cenário 6
0,0	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
0,5	0,9889	0,0194	0,9889	0,9890	0,0194	0,9893
1,0	0,9715	0,0194	0,9712	0,9719	0,0194	0,9723
1,5	0,9439	0,0194	0,9447	0,9445	0,0194	0,9464
2,0	0,9060	0,0194	0,9080	0,9068	0,0194	0,9104
2,5	0,8436	0,0194	0,8482	0,8447	0,0194	0,8514
3,0	0,7615	0,0194	0,7691	0,7628	0,0194	0,7731
3,5	0,6592	0,0194	0,6704	0,6606	0,0194	0,6746
4,0	0,5375	0,0194	0,5514	0,5388	0,0194	0,5555
4,5	0,3995	0,0194	0,4144	0,4006	0,0194	0,4177
5,0	0,2554	0,0194	0,2682	0,2561	0,0194	0,2706
5,5	0,1197	0,0194	0,1276	0,1200	0,0194	0,1278
6,0	0,0199	0,0194	0,0200	0,0199	0,0194	0,0200
6,5	0,0194	0,0194	0,0194	0,0194	0,0194	0,0194
7,0	0,0194	0,0194	0,0194	0,0194	0,0194	0,0194
7,5	0,0194	0,0194	0,0194	0,0194	0,0194	0,0194
8,0	0,0194	0,0194	0,0194	0,0194	0,0194	0,0194
8,5	0,0194	0,0194	0,0194	0,0194	0,0194	0,0194
9,0	0,0194	0,0194	0,0194	0,0194	0,0194	0,0194
9,5	0,0194	0,0194	0,0194	0,0194	0,0194	0,0194
10,0	0,0194	0,0194	0,0194	0,0194	0,0194	0,0194
10,5	0,0194	0,0194	0,0194	0,0194	0,0194	0,0194
11,0	0,0194	0,0194	0,0194	0,0194	0,0194	0,0194
11,5	0,0194	0,0194	0,0194	0,0194	0,0194	0,0194
12,0	0,0194	0,0194	0,0194	0,0194	0,0194	0,0194

Figura 26 - Vazão ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) x tempo (s) na válvula a Jusante. Válvula fechando em 2,1s



Observamos pelo gráfico exposto que, comparando os cenários 1(1ª Ordem c/vaf f) e 4(2ª. Ordem c/vaf f), 3(1ª. Ordem c/vaf f_R6) e 6(2ª. Ordem c/vaf f_R6), as aproximações de 1ª e 2ª ordens retornam gráficos semelhantes, isto é, curvas coincidentes. A alteração da rugosidade não representou grandes alterações para o comportamento da vazão.

Figura 27- Vazão ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) x tempo (s) na válvula a Jusante. Válvula fechando em 0,5s

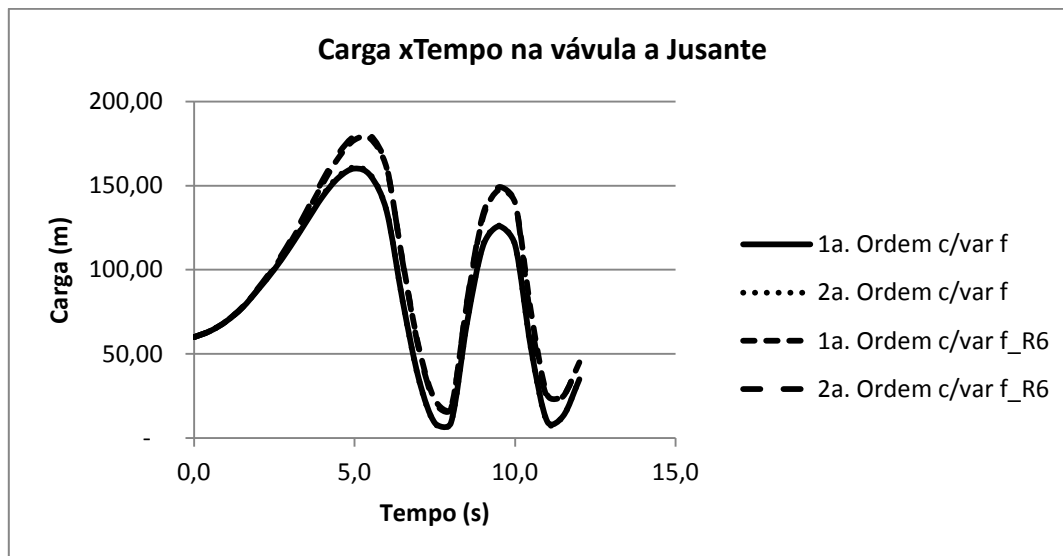


Observamos pelo gráfico exposto que, comparando os cenários 2(1ª. Ordem c/vaf $f(0,5)$) e 5(2ª. Ordem c/vaf $f(0,5)$), as aproximações de 1ª e 2ª ordens retornam gráficos semelhantes, isto é, curvas coincidentes. A alteração da rugosidade não representou grandes alterações para o comportamento da vazão.

Quadro 27 - Valores de carga (m) para cenários de 1 a 6

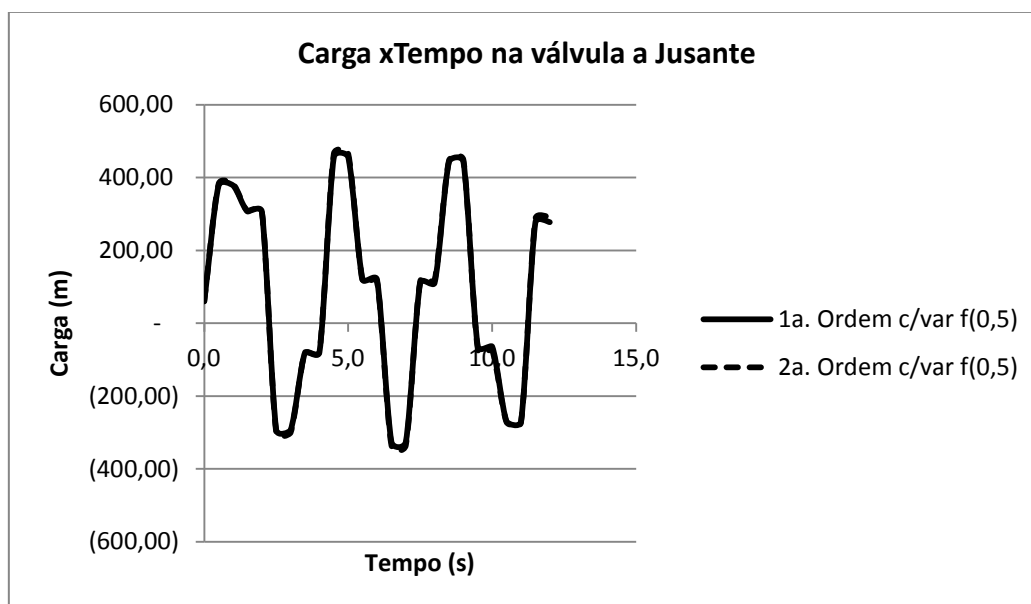
VÁLVULA A JUSANTE						
Tempo(s)	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5	Cenário 6
0,0	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00
0,5	63,61	378,17	63,61	63,62	382,42	63,66
1,0	69,37	378,28	69,33	69,39	382,44	69,49
1,5	77,40	306,74	77,53	77,49	308,02	77,81
2,0	88,38	306,55	88,78	88,54	307,84	89,27
2,5	100,27	- 293,41	101,35	100,53	- 300,51	102,14
3,0	113,86	- 293,47	116,20	114,29	- 300,49	117,38
3,5	128,71	- 80,35	133,15	129,27	- 79,26	134,83
4,0	143,44	- 80,15	150,94	144,15	- 79,09	153,12
4,5	154,74	456,25	166,62	155,60	465,19	169,09
5,0	160,14	456,27	177,22	160,95	465,13	179,46
5,5	155,69	119,59	177,75	156,31	114,87	179,72
6,0	134,55	119,40	160,18	134,81	114,72	160,91
6,5	81,11	- 326,04	104,63	80,93	- 335,27	104,11
7,0	35,06	- 326,01	53,88	34,58	- 335,18	52,76
7,5	8,94	110,54	22,54	8,49	114,98	20,84
8,0	9,06	110,72	18,01	8,89	118,17	17,43
8,5	68,48	443,40	80,31	68,79	447,12	81,32
9,0	114,26	443,33	131,40	114,88	448,20	133,02
9,5	125,87	- 64,36	147,55	126,28	- 71,44	149,14
10,0	114,59	- 64,52	139,62	114,60	- 74,85	139,88
10,5	52,61	- 269,98	74,19	52,06	- 272,30	68,76
11,0	9,80	- 269,86	25,68	9,08	- 272,51	23,69
11,5	13,26	277,20	25,31	13,07	287,07	24,95
12,0	34,96	277,34	45,02	35,11	290,46	45,17

Figura 28 - Carga (m) x tempo (s) na Válvula a Jusante. Válvula fechando em 2,1s



Observamos pelo gráfico exposto que, comparando os cenários 1(1ª Ordem c/vaf f) e 4(2ª. Ordem c/vaf f), 3(1ª. Ordem c/vaf f_R6) e 6(2ª. Ordem c/vaf f_R6), as aproximações de 1ª e 2ª ordens retornaram gráficos semelhantes, isto é, curvas coincidentes. A rugosidade 6 mm nos cenários 3 e 6 provocou uma considerável alteração na carga entre os instantes 3 s e 12 s, fato este perfeitamente justificável pela troca do material e representado pela curva tracejada.

Figura 29 - Carga (m) x tempo (s) na Válvula a Jusante. Válvula fechando em 0,5 s



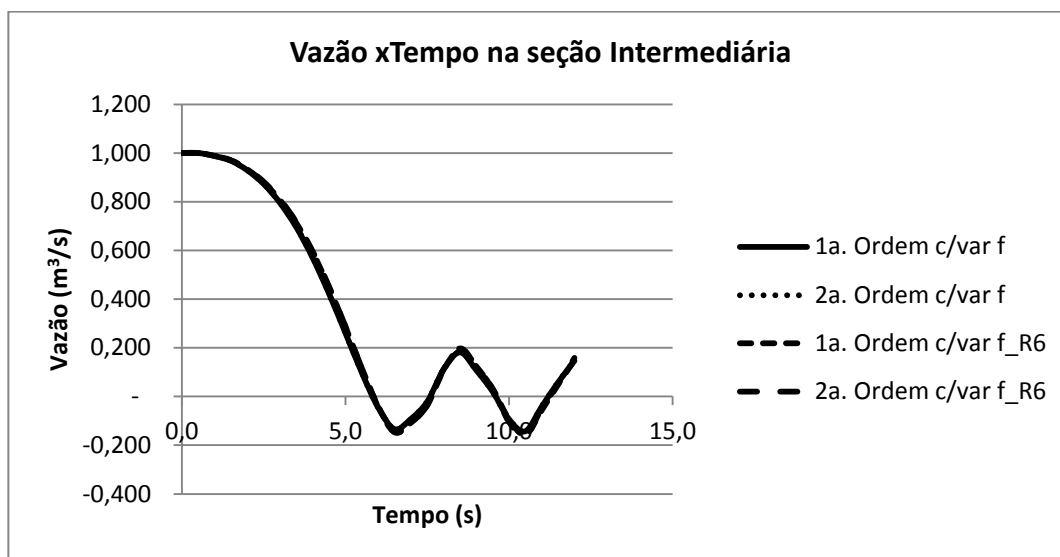
Observamos pelo gráfico exposto que, comparando os cenários 2(1ª. Ordem c/vaf $f(0,5)$) e 5(2ª. Ordem c/vaf $f(0,5)$), as aproximações de 1ª e 2ª ordens retornaram gráficos semelhantes, isto é, curvas coincidentes.

4.7 Seção Intermediária:

Quadro 28 - Valores de vazão ($m^3.s^{-1}$) para cenários de 1 a 6

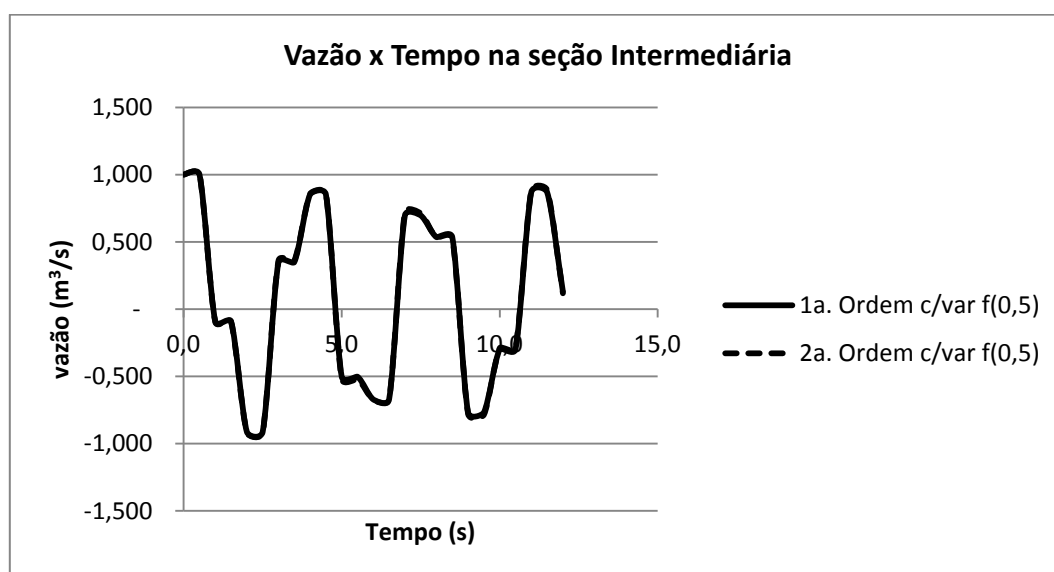
SEÇÃO INTERMEDIÁRIA						
Tempo(s)	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5	Cenário 6
0,0	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
0,5	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
1,0	0,9877	-0,0907	0,9882	0,9878	-0,0952	0,9885
1,5	0,9680	-0,0912	0,9695	0,9683	-0,0955	0,9702
2,0	0,9288	-0,9126	0,9325	0,9293	-0,9168	0,9340
2,5	0,8725	-0,9125	0,8794	0,8735	-0,9165	0,8818
3,0	0,7945	0,3489	0,8063	0,7957	0,3601	0,8095
3,5	0,6942	0,3493	0,7114	0,6956	0,3604	0,7151
4,0	0,5685	0,8527	0,5912	0,5699	0,8570	0,5949
4,5	0,4212	0,8524	0,4474	0,4223	0,8566	0,4502
5,0	0,2602	-0,5017	0,2856	0,2607	-0,5200	0,2868
5,5	0,0977	-0,5020	0,1162	0,0974	-0,5201	0,1158
6,0	-0,0455	-0,6713	-0,0397	-0,0465	-0,6734	-0,0430
6,5	-0,1339	-0,6710	-0,1447	-0,1348	-0,6731	-0,1470
7,0	-0,0919	0,6965	-0,1074	-0,0922	0,7181	-0,1089
7,5	-0,0206	0,6968	-0,0359	-0,0202	0,7122	-0,0350
8,0	0,1113	0,5350	0,1088	0,1123	0,5307	0,1126
8,5	0,1819	0,5346	0,1952	0,1827	0,5275	0,1976
9,0	0,1080	-0,7682	0,1235	0,1080	-0,7786	0,1239
9,5	0,0199	-0,7684	0,0321	0,0190	-0,7855	0,0300
10,0	-0,0936	-0,2983	-0,0939	-0,0948	-0,2900	-0,1044
10,5	-0,1423	-0,2979	-0,1568	-0,1432	-0,2851	-0,1596
11,0	-0,0412	0,8692	-0,0560	-0,0406	0,8799	-0,0481
11,5	0,0582	0,8693	0,0493	0,0595	0,8854	0,0525
12,0	0,1469	0,1300	0,1502	0,1479	0,1177	0,1588

Figura 30 - Vazão ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) x tempo (s) na seção intermediária. Válvula fechando em 2,1s



Observamos pelo gráfico exposto que, comparando os cenários 1(1ª Ordem c/vaf f) e 4(2ª. Ordem c/vaf f), 3(1ª. Ordem c/vaf f_R6) e 6(2ª. Ordem c/vaf f_R6), as aproximações de 1ª e 2ª ordens retornam gráficos semelhantes, isto é, curvas coincidentes. A alteração da rugosidade não representou grandes alterações para o comportamento da vazão.

Figura 31 - Vazão ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) x tempo (s) na seção intermediária. Válvula fechando em 0,5 s

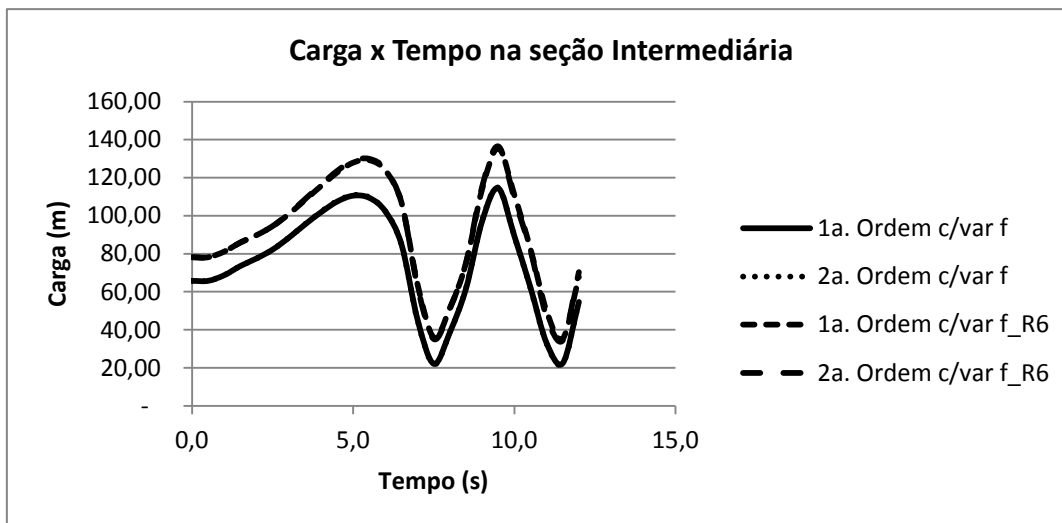


Observamos pelo gráfico exposto que, comparando os cenários 2(1ª. Ordem c/vaf $f(0,5)$) e 5(2ª. Ordem c/vaf $f(0,5)$), as aproximações de 1ª e 2ª ordens retornam gráficos semelhantes, isto é, curvas coincidentes. A alteração da rugosidade não representou grandes alterações para o comportamento da vazão.

Quadro 29 - Valores de carga (m) para cenários de 1 a 6

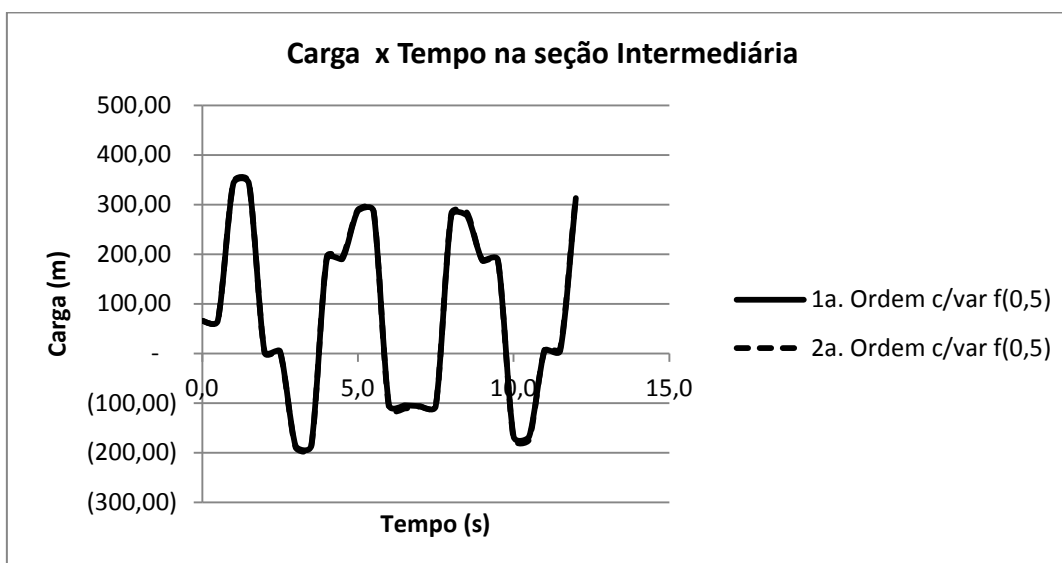
SEÇÃO INTERMEDIÁRIA						
Tempo(s)	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5	Cenário 6
0,0	65,74	65,74	78,15	65,74	65,74	78,15
0,5	65,74	65,74	78,15	65,74	65,74	78,15
1,0	68,71	342,42	81,14	68,71	345,20	81,15
1,5	73,56	342,38	85,89	73,54	345,13	85,92
2,0	77,52	4,30	89,76	77,53	2,13	89,81
2,5	82,18	4,18	94,46	82,19	2,05	94,54
3,0	88,41	-186,50	100,84	88,46	-189,58	101,07
3,5	95,36	-186,43	108,21	95,49	-189,49	108,63
4,0	101,83	190,03	115,61	102,06	194,52	116,25
4,5	107,43	190,13	122,72	107,72	194,57	123,56
5,0	110,54	287,17	127,95	110,88	289,51	128,89
5,5	109,39	287,08	129,21	109,68	289,41	129,90
6,0	102,17	-104,53	123,78	102,31	-111,07	124,36
6,5	84,67	-104,62	106,75	84,60	-111,10	106,67
7,0	45,00	-106,34	63,49	44,70	-107,14	62,44
7,5	22,06	-106,23	35,94	21,74	-105,83	35,09
8,0	38,76	277,82	51,54	38,68	281,67	51,17
8,5	61,78	277,88	75,06	61,97	283,80	75,44
9,0	97,22	187,82	114,07	97,57	186,67	115,33
9,5	114,43	187,70	135,52	114,75	185,49	136,46
10,0	89,21	-167,45	110,79	89,10	-172,02	108,92
10,5	62,12	-167,48	82,43	61,81	-173,83	81,69
11,0	32,93	5,77	49,73	32,56	9,02	46,85
11,5	22,39	5,89	35,38	22,11	10,63	34,45
12,0	54,61	313,07	67,74	54,83	319,02	70,33

Figura 32 - Carga (m) x tempo (s) na seção intermediária. Válvula fechando em 2,1s



Observamos pelo gráfico exposto que, comparando os cenários 1(1ª Ordem c/vaf f) e 4(2ª. Ordem c/vaf f), 3(1ª. Ordem c/vaf f_R6) e 6(2ª. Ordem c/vaf f_R6), as aproximações de 1ª e 2ª ordens retornaram gráficos semelhantes, isto é, curvas coincidentes. A rugosidade 6 mm nos cenários 3 e 6 provocou uma considerável alteração na carga entre os instantes 0s e 12 s, fato este perfeitamente justificável pela troca do material e representado pela curva tracejada.

Figura 33 - Carga (m) x tempo (s) na seção intermediária. Válvula fechando em 0,5s



Observamos pelo gráfico exposto que, comparando os cenários 2(1ª. Ordem c/vaf $f(0,5)$) e 5(2ª. Ordem c/vaf $f(0,5)$), as aproximações de 1ª e 2ª ordens retornaram gráficos semelhantes, isto é, curvas coincidentes.

Para o cenário hipotético citada no quadro 3 da metodologia, observou-se os seguintes resultados:

Quadro 30 – Valores de Vazão e Carga na válvula a jusante para situação teste com aproximação de 1ª ordem

VÁLVULA A JUSANTE		
Tempo(s)	Vazão (m ³ /s)	Carga (m)
0,00	0,001	10,00
0,25	0,010	-11335,71
0,50	0,010	-11335,71
0,75	1,015	155143239,90
1,00	0,747	155462962,90
1,25	91464103,350	5,05E+24
1,50	54242181,660	5,05E+24
1,75	-2,530E+40	5,54E+90
2,00	1,130E+11	5,53E+90

Observou-se uma total desestabilidade do modelo para aproximação de 1ª. Ordem com valores encontrados extremos e absurdos.

Quadro 31 – Valores de Vazão e Carga na válvula a jusante para situação teste com aproximação de 2ª. Ordem

VÁLVULA A JUSANTE		
Tempo(s)	Vazão (m ³ /s)	Carga (m)
0,00	0,001	10
0,25	0,003	-17.458,14
0,50	0,005	-35.780,50
0,75	0,005	-51.336,10
1,00	0,007	-89.110,95
1,25	0,011	-197.669,74
1,50	0,014	-324.491,18
1,75	0,019	-527.376,30
2,00	0,025	-904.602,54

Observou-se que, mesmo com valores elevados, o modelo conseguiu plotar resultados corrigindo as distorções apresentadas na aproximação de 1ª Ordem.

4.8 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Para a tubulação sem variação de diâmetro, após análise das seções $x/L = 0,2$ a 1 (válvula a jusante), podemos concluir o seguinte:

Para válvula a Jusante:

Comparou-se o cenário 1 com o cenário 6 (vide quadros 5 e 6 para vazão e quadros 7 e 8 para carga) e observou-se que as aproximações de 1ª e 2ª ordem retornam valores semelhantes com gráficos superpostos (ver figuras 6 e 7 para vazão e figuras 8 e 9 para carga).

Comparou-se o cenário 2 com o cenário 7 (vide quadros 5 e 6 para vazão e quadros 7 e 8 para carga) e observou-se que as aproximações de 1ª e 2ª ordem retornam valores semelhantes com gráficos superpostos (ver figuras 6 e 7 para vazão e figuras 8 e 9 para carga).

Comparou-se o cenário 3 com o cenário 8 (vide quadros 5 e 6 para vazão e quadros 7 e 8 para carga) e observou-se que as aproximações de 1ª e 2ª ordem retornam valores semelhantes com gráficos superpostos (ver figuras 6 e 7 para vazão e figuras 8 e 9 para carga).

Comparou-se o cenário 4 com o cenário 9 (vide quadros 5 e 6 para vazão e quadros 7 e 8 para carga) e observou-se que as aproximações de 1ª e 2ª ordem retornam valores semelhantes com gráficos superpostos (ver figuras 6 e 7 para vazão e figuras 8 e 9 para carga).

Comparou-se o cenário 5 com o cenário 10 (vide quadros 5 e 6 para vazão e quadros 7 e 8 para carga) e observou-se que as aproximações de 1ª e 2ª ordem retornam valores semelhantes com gráficos superpostos (ver figuras 6 e 7 para vazão e figuras 8 e 9 para carga).

Para $x/L = 0,8$:

Comparou-se o cenário 1 com o cenário 6 (vide quadros 9 e 10 para vazão e quadros 11 e 12 para carga) e observou-se que as aproximações de 1ª e 2ª ordem retornam valores semelhantes com gráficos superpostos (ver figuras 10 e 11 para vazão e figuras 12 e 13 para carga).

Comparou-se o cenário 2 com o cenário 7 (vide quadros 9 e 10 para vazão e quadros 11 e 12 para carga) e observou-se que as aproximações de 1ª e 2ª ordem retornam valores semelhantes com gráficos superpostos (ver figuras 10 e 11 para vazão e figuras 12 e 13 para carga).

Comparou-se o cenário 3 com o cenário 8 (vide quadros 9 e 10 para vazão e quadros 11 e 12 para carga) e observou-se que as aproximações de 1ª e 2ª ordem retornam valores semelhantes com gráficos superpostos (ver figuras 10 e 11 para vazão e figuras 12 e 13 para carga).

Comparou-se o cenário 4 com o cenário 9 (vide quadros 9 e 10 para vazão e quadros 11 e 12 para carga) e observou-se que as aproximações de 1ª e 2ª ordem retornam valores semelhantes com gráficos superpostos (ver figuras 10 e 11 para vazão e figuras 12 e 13 para carga).

Comparou-se o cenário 5 com o cenário 10 (vide quadros 9 e 10 para vazão e quadros 11 e 12 para carga) e observou-se que as aproximações de 1ª e 2ª ordem retornam valores semelhantes com gráficos superpostos (ver figuras 10 e 11 para vazão e figuras 12 e 13 para carga).

Para $x/L = 0,6$:

Comparou-se o cenário 1 com o cenário 6 (vide quadros 13 e 14 para vazão e quadros 15 e 16 para carga) e observou-se que as aproximações de 1ª e 2ª ordem retornam valores semelhantes com gráficos superpostos (vide figuras 14 e 15 para vazão e figuras 16 e 17 para carga).

Comparou-se o cenário 2 com o cenário 7 (vide quadros 13 e 14 para vazão e quadros 15 e 16 para carga) e observou-se que as aproximações de 1ª e 2ª ordem retornam valores semelhantes com gráficos superpostos (vide figuras 14 e 15 para vazão e figuras 16 e 17 para carga).

Comparou-se o cenário 3 com o cenário 8 (vide quadros 13 e 14 para vazão e quadros 15 e 16 para carga) e observou-se que as aproximações de 1ª e 2ª ordem retornam valores semelhantes com gráficos superpostos (vide figuras 14 e 15 para vazão e figuras 16 e 17 para carga).

Comparou-se o cenário 4 com o cenário 9 (vide quadros 13 e 14 para vazão e quadros 15 e 16 para carga) e observou-se que as aproximações de 1ª e 2ª ordem retornam valores semelhantes com gráficos superpostos (vide figuras 14 e 15 para vazão e figuras 16 e 17 para carga).

Comparou-se o cenário 5 com o cenário 10 (vide quadros 13 e 14 para vazão e quadros 15 e 16 para carga) e observou-se que as aproximações de 1ª e 2ª ordem retornam valores semelhantes com gráficos superpostos (vide figuras 14 e 15 para vazão e figuras 16 e 17 para carga).

Para $x/L = 0,4$:

Comparou-se o cenário 1 com o cenário 6 (vide quadros 17 e 18 para vazão e quadros 19 e 20 para carga) e observou-se que as aproximações de 1ª e 2ª ordem retornam valores semelhantes com gráficos superpostos (vide figuras 18 e 19 para vazão e figuras 20 e 21 para carga).

Comparou-se o cenário 2 com o cenário 7 (vide quadros 17 e 18 para vazão e quadros 19 e 20 para carga) e observou-se que as aproximações de 1ª e 2ª ordem retornam valores semelhantes com gráficos superpostos (vide figuras 18 e 19 para vazão e figuras 20 e 21 para carga).

Comparou-se o cenário 3 com o cenário 8 (vide quadros 17 e 18 para vazão e quadros 19 e 20 para carga) e observou-se que as aproximações de 1ª e 2ª ordem retornam valores semelhantes com gráficos superpostos (vide figuras 18 e 19 para vazão e figuras 20 e 21 para carga).

Comparou-se o cenário 4 com o cenário 9 (vide quadros 17 e 18 para vazão e quadros 19 e 20 para carga) e observou-se que as aproximações de 1ª e 2ª ordem retornam valores semelhantes com gráficos superpostos (vide figuras 18 e 19 para vazão e figuras 20 e 21 para carga).

Comparou-se o cenário 5 com o cenário 10 (vide quadros 17 e 18 para vazão e quadros 19 e 20 para carga) e observou-se que as aproximações de 1ª e 2ª ordem retornam valores semelhantes com gráficos superpostos (vide figuras 18 e 19 para vazão e figuras 20 e 21 para carga).

Para $x/L= 0,2$:

Comparou-se o cenário 1 com o cenário 6 (vide quadros 21 e 22 para vazão e quadros 23 e 24 para carga) e observou-se que as aproximações de 1ª e 2ª ordem retornam valores semelhantes com gráficos superpostos (vide figuras 22 e 23 para vazão e figuras 24 e 25 para carga).

Comparou-se o cenário 2 com o cenário 7 (vide quadros 21 e 22 para vazão e quadros 23 e 24 para carga) e observou-se que as aproximações de 1ª e 2ª ordem retornam valores semelhantes com gráficos superpostos (vide figuras 22 e 23 para vazão e figuras 24 e 25 para carga).

Comparou-se o cenário 3 com o cenário 8 (vide quadros 21 e 22 para vazão e quadros 23 e 24 para carga) e observou-se que as aproximações de 1ª e 2ª ordem retornam valores semelhantes com gráficos superpostos (vide figuras 22 e 23 para vazão e figuras 24 e 25 para carga).

Comparou-se o cenário 4 com o cenário 9 (vide quadros 21 e 22 para vazão e quadros 23 e 24 para carga) e observou-se que as aproximações de 1ª e 2ª ordem retornam valores semelhantes com gráficos superpostos (vide figuras 22 e 23 para vazão e figuras 24 e 25 para carga).

Comparou-se o cenário 5 com o cenário 10 (vide quadros 21 e 22 para vazão e quadros 23 e 24 para carga) e observou-se que as aproximações de 1ª e 2ª ordem retornam valores semelhantes com gráficos superpostos (vide figuras 22 e 23 para vazão e figuras 24 e 25 para carga).

Da mesma forma, após análise da seção intermediária e válvula a jusante da tubulação com diâmetros D1 e D2, podemos concluir:

Para válvula a jusante:

Comparou-se a cenário 1 com cenário 3 (vide quadro 26 para vazão e quadro 27 para carga) e, nas seções estudadas, observou-se que as aproximações de 1ª e 2ª ordem retornam valores semelhantes com gráficos superpostos (vide figuras 26 e 27 para vazão e figuras 28 e 29 para carga).

Comparou-se o cenário 2 com o cenário 4 (vide quadro 26 para vazão e quadro 27 para carga) e, nas seções estudadas, observou-se que as

aproximações de 1ª e 2ª ordem retornam valores semelhantes com gráficos superpostos (vide figuras 26 e 27 para vazão e figuras 28 e 29 para carga).

Comparou-se o cenário 3 com o cenário 6 (vide quadro 26 para vazão e quadro 27 para carga) e, nas seções estudadas, observou-se que as aproximações de 1ª e 2ª ordem retornam valores semelhantes com gráficos superpostos (vide figuras 26 e 27 para vazão e figuras 28 e 29 para carga).

Para seção intermediária:

Comparou-se o cenário 1 com o cenário 3 (vide quadro 28 para vazão e quadro 29 para carga) e, nas seções estudadas, observou-se que as aproximações de 1ª e 2ª ordem retornam valores semelhantes com gráficos superpostos (vide figuras 30 e 31 para vazão e figuras 32 e 33 para carga).

Comparou-se o cenário 2 com o cenário 4 (vide quadro 28 para vazão e quadro 29 para carga) e, nas seções estudadas, observou-se que as aproximações de 1ª e 2ª ordem retornam valores semelhantes com gráficos (vide figuras 30 e 31 para vazão e figuras 32 e 33 para carga).

Comparou-se o cenário 3 com o cenário 6 (vide quadro 28 para vazão e quadro 29 para carga) e, nas seções estudadas, observou-se que as aproximações de 1ª e 2ª ordem retornam valores semelhantes com gráficos superpostos (vide figuras 30 e 31 para vazão e figuras 32 e 33 para carga).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Concluimos que dadas as variações do fator de atrito, rugosidade, tempo de fechamento de válvula, o comportamento das curvas para as aproximações de 1ª e 2ª ordens foram semelhantes.

Segundo Araújo (2003), para pequenos intervalos de tempo as técnicas de 1ª ordem sugeridas por Wylie e Streeter (1978) são suficientemente viáveis e precisas mas se o termo de atrito torna-se muito grande, essa aproximação pode retornar resultados instáveis o que, para tanto, uma aproximação de 2ª ordem ou um método previsor-corretor seriam indicados para evitar instabilidades.

O teste com o cenário hipotético mostrou ser verdade a afirmação anterior corrigindo as distorções encontradas no modelo de 1ª Ordem.

Nos casos estudados não houveram grandes variações do termo de atrito o que confirma ser suficiente a aproximação de 1ª ordem para os exemplos observados haja vista a semelhança das curvas de 2ª ordem com a primeira, obedecendo o critério de estabilidade apresentado.

Sugerimos como complemento desse trabalho que, os testes com aproximação de 1ª e 2ª Ordens além da estabilidade, sejam experimentados para pequenas redes de água começando por tubulação com variação de três diâmetros D1, D2 e D3.

REFERÊNCIAS

AMADO, J.M.P.; MARQUES, J.A.S. Modelação hidráulica de escoamentos permanentes e variáveis em pressão: método das características “adaptado”. In: Congresso da Água, 7., 2004, Lisboa. **Anais...**Lisboa: Associação Portuguesa de Recursos Hídricos, 2004.

ARAÚJO, F. F. V. de; CASTRO, M.A.H. de; RICHETTO, A. M. Modelo hidráulico baseado no método das características: análise de convergência e comparações com o EPANET. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.15, n.3, jul./set. 2010, p.5-19.

ARAÚJO, J. K. (2003). **Calibração de redes de distribuição de água pelo método inverso aplicado a escoamento transiente**. São Carlos, 2003. 166p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

AZEVEDO NETO, José. **Manual de hidráulica**. São Paulo: Blucher, 1998.

BLOCH, S. C. **Excel para engenheiros e cientistas**. Rio de Janeiro: Ltc, 2011.

CARDOSO, G.C.G.; FRIZZONE, J.A.; REZENDE, R. Fator de atrito em tubos de polietileno de pequenos diâmetros. **Acta. As. Agron.**, Maringá, v.30, n.3, p.299-305, 2008.

CHAUDHRY, M. HANIF. **Applied hydraulic transients**. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1987.

DUAN, H. F. et al. Relevance of unsteady friction to pipe size and length in pipe fluid transients. **Journal of Hydraulic Engineering**, Vol.138(2), p.154(13), Feb., 2012.

EPSTEIN, Michael. A simple approach to the prediction of waterhammer transients in a pipe line with entrapped air. **Nuclear Engineering and Design**, Vol.238 (9), p.2182-2188, 2008.

HOLLOWAY, Michael B.; CHAUDHRY, M.H. Stability and accuracy of waterhammer analysis. **Advances in Water Resources**, Vol.8(3), p.121-128, 1985.

LIMA, L.F.M. **Termo de atrito em escoamento transitório para condutos forçados**. São Paulo, 2006. 131f. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

MELLO, C. R. de; FERREIRA, D.F.; CARVALHO, J de A. Equações explícitas para o fator de atrito em equação da Darcy-Weisbach. **Ciênc. e Agrotec.**, Lavras, v.23, n.2, p.365-371, abr./jun. 1999.

PERSON, Ron. **Usando Excel for Windows: versão 5**. Rio de Janeiro: Campus, 1995.

PIRES, L.F.G.; LADEIA, R.C. da C.; BARRETO, C.V. **Análise de transientes devido a fechamento rápido de válvulas em dutos curtos**. Disponível em: <<http://www.simdut.com.br/Trabalhos/13005.pdf>>. Acesso em: 3 nov. 2013.

PORTO, R. de M. **Hidráulica básica**. 4.ed. São Carlos (SP): EESC-USP, 2006.

PROVENZANO, P.G.; BARONI, F.; AGUERRE, R.J. The closing function in the waterhammer modeling. **Latin American Applied Research**, 41: 43-47, 2001.

PROVENZANO, P.G.; BARONI, F.; AGUERRE, R.J. The closing Function in the Waterhammer modeling. **Latin American Applied Research**, v.41(1), p.43-47, 2011.

SHIMADA, M ; Brown, J ; Vardy, A. Estimating friction errors in MOC analyses of unsteady pipe flows. **Computers & Fluids**, v.36(7), p.1235-1246, 2007.

SOUZA, R.S. de. **Controle operacional otimizado de redes de distribuição de água usando a teoria do regulador quadrático linear**. São Carlos (SP), 1998. Tese (Doutorado) – Escola de engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

STONE, Geoffrey D. Contractual and physical risks from waterhammer. **World Pumps**, v.2006 (473), p.34-38, 2006.

VIARO, V.L.; ANDRADE, J.G.P. de; LUVIZOTTO JÚNIOR, E. Influência do fator de atrito variável na avaliação do escoamento transitório em sistemas hidráulicos. Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 21, 2001, João Pessoa: **Anais...** João Pessoa: ABES, 2001.

WOOD, Don J. Waterhammer analysis: essential and easy (and efficient). **Journal of Environmental Engineering**, v.131 (8), p.1123-1131, Aug. 2005.

WYLIE, E. B., STREETER, V. L. **Fluid transients**. New York: McGraw-Hill, 1978.

WYLIE, E. B., STREETER, V. L. **Mecânica dos fluídos**. 7.ed. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1982.