

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS  
ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**ANÁLISE DO FATOR DE ATRITO VARIÁVEL E  
DA VISCOELASTICIDADE DURANTE  
ESCOAMENTOS TRANSITÓRIOS EM  
CONDUTOS FORÇADOS**

**JOSÉ FERNANDES JÚNIOR**

GOIÂNIA  
2018



JOSÉ FERNANDES JÚNIOR

**ANÁLISE DO FATOR DE ATRITO VARIÁVEL E  
DA VISCOELASTICIDADE DURANTE  
ESCOAMENTOS TRANSITÓRIOS EM  
CONDUTOS FORÇADOS**

Exame de Qualificação parcial apresentado na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II do Curso de Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás para obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. Dr. Joel Roberto Guimarães Vasco

Co-Orientador: Prof. Dr. Alexandre Kepler Soares

GOIÂNIA  
2018



JOSÉ FERNANDES JÚNIOR

ANÁLISE DO FATOR DE ATRITO VARIÁVEL E DA VISCOELASTICIDADE  
DURANTE ESCOAMENTOS TRANSITÓRIOS EM CONDUTOS FORÇADOS

Monografia apresentada no Trabalho de Conclusão de Curso 2 do Curso de Graduação  
em Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás.

Aprovado em: 10 / 12 / 2018.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Joel Roberto Guimarães Vasco – Universidade Federal de Goiás (Orientador)

Prof. Dr. José Vicente Granato de Araújo – Universidade Federal de Goiás

Prof. Dr. Saulo Bruno Silveira e Souza – Universidade Federal de Goiás

Atesto que as revisões solicitadas foram feitas:

Prof. Dr. Joel Roberto Guimarães Vasco (orientador)

Em: 14 / 12 / 2018



## **LISTA DE FIGURAS**

|   |    |
|---|----|
| Figura 1.1 - Implosão do conduto forçado da Usina Hidrelétrica de Oigawa, Japão, devido à sub pressão gerada pelo transitório no duto. .... | 05 |
| Figura 1.2 - Casa de forças da Usina Hidrelétrica de Sayano antes e depois do colapso.....  | 05 |
| Figura 2.1 - Variação do perfil de velocidades no evento transiente. ....   | 11 |
| Figura 2.2 - Curvas $W(\varphi)$ variando com $f_F Re$ .....  | 14 |
| Figura 2.3 - Esquema do modelo Kelvin-Voigt Generalizado. ....  | 16 |
| Figura 2.4 - Malha característica do MOC.....   | 17 |
| Figura 2.5 - Malha característica do MOC detalhada.....   | 18 |
| Figura 3.3 - Sistema <i>Imperial College</i> . ....   | 23 |



## **LISTA DE QUADROS**

|   |    |
|---|----|
| Quadro 3.1 - Valores dos termos $C'_{P1,2}$ , $C''_{P1,2}$ , $C'''_{P1,2}$ , $C'_{N1,2}$ e $C''_{N1,2}$ , $C'''_{N1,2}$ ..... | 22 |
| Quadro 4.1 - Valores de entrada para simulações nas rotinas computacionais desenvolvidas.                                     | 27 |



# SUMÁRIO

|  |           |
|--|-----------|
| <b>CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO.....</b>  | <b>03</b> |
| <b>1.1 JUSTIFICATIVA .....</b>   | <b>04</b> |
| <b>1.2 OBJETIVOS GERAL E ESPECÍFICOS .....</b>                           | <b>06</b> |
| <b>CAPÍTULO 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>                            | <b>09</b> |
| <b>2.1 EQUAÇÕES CLÁSSICAS DO TRANSITÓRIO HIDRÁULICO.....</b>             | <b>09</b> |
| <b>2.2 FATOR DE ATRITO NO TRANSITÓRIO HIDRÁULICO .....</b>               | <b>11</b> |
| <b>2.3 VISCOELASTICIDADE DE CONDUTOS PLÁSTICOS. ....</b>                 | <b>14</b> |
| <b>2.4 MÉTODO DAS CARACTERÍSTICAS.....</b>                               | <b>17</b> |
| <b>CAPÍTULO 3 METODOLOGIA.....</b>                                       | <b>19</b> |
| <b>3.1 MÉTODO DAS CARACTERÍSTICAS.....</b>                               | <b>19</b> |
| <b>3.2 SISTEMA <i>IMPERIAL COLLEGE</i> E CONDIÇÕES DE CONTORNO .....</b> | <b>23</b> |
| <b>CAPÍTULO 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>                           | <b>27</b> |
| <b>4.1 DADOS DO <i>IMPERIAL COLLEGE</i> .....</b>                        | <b>27</b> |
| <b>4.2 SIMULAÇÕES REALIZADAS .....</b>                                   | <b>28</b> |
| <b>4.3 GRÁFICOS GERADOS.....</b>   | <b>29</b> |
| <b>4.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS .....</b>                                  | <b>52</b> |
| <b>CAPÍTULO 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>                             | <b>55</b> |
| <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>                                  | <b>57</b> |



# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

Redes de condutos forçados consistem em estruturas destinadas ao transporte de fluidos sob pressão, como sistemas de distribuição de água destinados ao abastecimento público e transporte de esgotos domésticos por sistemas de recalque. Associados aos transportes dos fluidos sob pressão estão os transitórios hidráulicos, regimes de escoamento que apresentam variações de pressão e vazão causadas por perturbações no escoamento permanente. A parada automática das bombas, os ajustes das válvulas de controle e eventos acidentais, como queda de energia elétrica em sistemas de bombeamento, são fatores que geram condições transitórias nos condutos forçados. De acordo com Jung *et al.* (2007), o comportamento dos sistemas de abastecimento de água sob condições de escoamento transitório deve ser devidamente avaliado, visando evitar falhas no abastecimento e proporcionar seu funcionamento confiável e seguro. Segundo Wichowski (2006), é importante considerar o escoamento transitório na concepção, manutenção e operação dos sistemas de distribuição de água. Para tanto, modelos hidráulicos são usualmente empregados para as simulações computacionais. Para que tais modelos sejam confiáveis na reprodução das condições de escoamento, é preciso que eles levem em consideração os fenômenos hidráulicos durante o escoamento transitório. Um dos fenômenos mais importantes na análise dos transitórios é a atenuação das variações de pressão devido ao comportamento dinâmico da tensão de atrito nas paredes do conduto e, também, do comportamento reológico do conduto.

De acordo com Karney (2006), eventos transitórios podem criar mudanças nas condições iniciais de escoamento, gerando picos de pressão no interior do conduto e, quando a tensão interna gerada excede a máxima tensão resistida pelo material do conduto, o mesmo pode romper. Da mesma forma, picos de pressão negativa ocorrem, o que pode levar o fluido em escoamento a cavitá, gerando a separação da coluna d'água no interior do conduto.

A análise do fator de atrito em transitórios hidráulicos é de suma importância no que tange o estudo do comportamento e a modelagem do fenômeno, uma vez que o próprio fator de atrito é responsável pelo amortecimento dos picos de pressão gerados e pelo posterior equilíbrio do sistema. Assim, destacando-se a perda de carga no escoamento proveniente do fator de atrito, Holmboe e Rouleau (1967) propuseram a separação desta perda em duas parcelas, sendo uma

proveniente de um fator de atrito permanente e uma do fator de atrito variável que é função da velocidade do escoamento, variável no interior do conduto.

De acordo com Soares (2007, apud FERRY, 1970; AKLONIS & MACKNIGHT, 1983), para condutos feitos de materiais plásticos, como o caso de polietileno e PVC, que apresentam comportamento reológico viscoelástico (propriedade de deformação lenta ao longo do tempo), o modelo clássico do golpe de aríete é consideravelmente impreciso. Isso se deve ao fato de que tal modelo considera que o material constituinte do conduto apresente comportamento mecânico elástico linear, como é o caso de condutos feitos de concreto e metais.

Ao se tentar modelar o fenômeno transitório a partir de um fator de atrito para regime permanente, foram verificadas diferenças entre os resultados dessas formulações e os sistemas reais observados. Desta forma, verificou-se a necessidade de tratar o fator de atrito separadamente, de forma distinta para os regimes permanente e transitório (Vardy *et al.*, 1993; Vítkovsky *et al.*, 2000; Ramos *et al.*, 2004).

Com seus estudos experimentais desenvolvidos com tubos de aço e PVC, Meißner e Franke (1997) chegaram à conclusão que o amortecimento dos picos de pressão gerados pelo efeito transitório era mais influenciado pelo comportamento viscoelástico do material do que pelo fator de atrito, embora o efeito do fator de atrito variável não tenha sido considerado.

Este trabalho busca analisar os efeitos do fator de atrito variável e da viscoelasticidade da tubulação no transitório hidráulico através da implementação de modelos teóricos em uma rotina computacional em C<sup>++</sup> para um sistema reservatório-tubo-válvula.

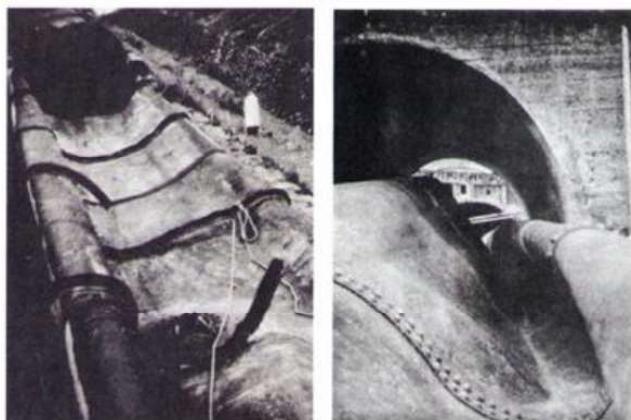
## 1.1 JUSTIFICATIVA

Segundo Chaudhry (2014), devido a um excesso de pressão causado por erros operacionais e por mal funcionamento de equipamentos, ocorreu a explosão de um dos condutos forçados da Usina Hidrelétrica de Oigawa, Japão, em uma seção a montante. O escoamento gerado pela explosão acarretou na queda da linha piezométrica criando um vazio e o consequente colapso do conduto. Esse acidente resultou em um prejuízo de meio milhão de dólares e a morte de três funcionários. A Figura 1.1 mostra como ficou o conduto implodido devido à subpressão.

Mais recentemente, segundo Cruz (2009), em agosto de 2009, um aumento súbito de pressão na turbina 2 da Usina Hidrelétrica de Sayano, na Rússia (usina com queda de 194 m, potência

desenvolvida de 650 MW e rotor de 6,77 m e 156 toneladas de massa), gerou um deslocamento vertical da turbina, causando um fechamento súbito de válvula. O efeito transitório gerado foi capaz de levantar todo o equipamento de cerca de 900 toneladas. Como consequências do acidente, pode-se citar a morte de 76 funcionários que trabalhavam no local, prejuízo de 310 milhões de dólares, mais de 500 mil toneladas de alumínio perdidas e a contaminação do rio de instalação da hidrelétrica com óleo que vazou. A Figura 1.2 mostra a região do acidente, dentro da casa de forças, antes e depois do colapso da estrutura.

Figura 1.1 – Implosão do conduto forçado da Usina Hidrelétrica de Oigawa, Japão, devido à sub pressão gerada pelo transitório no duto.



Fonte: Chaudhry (2014).

Figura 1.2 – Casa de forças da Usina Hidrelétrica de Sayano antes e depois do colapso.



Fonte: Cruz (2009).

Devido à importância e necessidade de tratar o fenômeno dos transitórios hidráulicos, estudos foram desenvolvidos e formulações continuam sendo propostas na tentativa de modelar o efeito. A partir das equações da conservação de massa e quantidade de movimento aplicadas ao regime transitório, as análises das vazões e pressões puderam ser feitas. Trabalhos de autores como Vardy *et al.* (1993), Vitkovský *et al.* (2000) e Ramos *et al.* (2004), estudaram o fator de atrito variável através da análise das tensões no regime de escoamento transitório e o aprimoraram a partir de trabalhos anteriores, apresentando as influências que o fator de atrito variável possui tanto na forma de atenuação dos picos de pressão como no retardo das ondas de pressão no interior da tubulação.

A partir de estudos desenvolvidos sobre a viscoelasticidade na época, Franke e Seyler (1983) chegaram à conclusão de que muitos materiais comumente empregados em tubulações hidráulicas, mesmo que caracterizados como materiais com comportamento elástico linear, apresentavam certo grau de viscoelasticidade.

Fica evidente, assim, que o efeito do fator de atrito variável e da viscoelasticidade dos materiais dos condutos têm influência na análise da atenuação das pressões geradas devido ao transitório hidráulico em escoamentos forçados. Desenvolver modelos hidráulicos que levam em consideração tais fenômenos é de suma importância para a reprodução do comportamento real dos sistemas hidráulicos durante eventos transitórios.

## 1.2 OBJETIVOS GERAL E ESPECÍFICOS

O objetivo geral deste trabalho é analisar os modelos propostos na literatura para a reprodução dos transitórios hidráulicos em sistemas de distribuição de água considerando tensão de atrito variável e o efeito da viscoelasticidade para tubulações. Foram desenvolvidas rotinas computacionais em linguagem C++ para a análise de tais efeitos no transitório hidráulico.

Os objetivos específicos deste Trabalho de Conclusão de Curso são:

- Validar o modelo a rotina computacional desenvolvida com o modelo viscoelástico comparando-se os resultados experimentais obtidos por Covas (2003) com os resultados teóricos obtidos através do código desenvolvido, para condutos formados pelo material polietileno de alta densidade (PEAD);

- Gerar gráficos para os modelos propostos pela literatura de fator de atrito variável com o intuito de se comparar os três modelos propostos entre si, analisando as suas particulares influências no amortecimento dos picos de pressão variando-se os valores de suas constantes de amortecimento e negligenciando o modelo viscoelástico;
- Simular os efeitos do transitório hidráulico para o modelo viscoelástico proposto atuando juntamente com o fator de atrito variável para o material PEAD para se verificar a influência desses dois fatores atuando em conjunto no amortecimento dos picos de pressão.



## CAPÍTULO 2

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo foram levantados os principais trabalhos na literatura a respeito do fator de atrito variável e da viscoelasticidade de condutos durante o transitório hidráulico. Para isso, são apresentados o equacionamento básico que rege o transitório em condutos forçados bem como os trabalhos de Vardy *et al.* (1993), Vitkovský *et al.* (2000) e Ramos *et al.* (2004) para fator de atrito variável e o modelo de viscoelasticidade do trabalho de Covas (2003).

#### 2.1 EQUAÇÕES CLÁSSICAS DO TRANSITÓRIO HIDRÁULICO

O fluxo transitório em um conduto sob pressão é governado por equações diferenciais parciais não-lineares, representativas das leis da conservação de massa (2.1) e da quantidade de movimento (2.2) (Chaudhry, 2014; Wylie e Streeter, 1993).

$$\frac{dH}{dt} + \frac{c^2}{gA} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{1}{gA} \frac{dQ}{dt} + h_f = 0 \quad (2.2)$$

nas quais  $Q$  é vazão de escoamento,  $H$  a carga piezométrica,  $c$  velocidade elástica da onda,  $g$  a aceleração da gravidade,  $A$  a área da seção transversal do conduto,  $x$  a coordenada ao longo do eixo do conduto,  $t$  o tempo,  $h_f$  a declividade da linha de energia,  $d/dt$  é a derivada total descrita por  $\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + v \frac{\partial}{\partial x}$  e  $v$  = velocidade absoluta do fluido em escoamento.

Para se obter as equações 2.1 e 2.2, foram assumidas as seguintes considerações: (i) o fluido é monofásico, homogêneo e compressível, onde a compressibilidade do mesmo foi incorporada à velocidade de propagação da onda elástica; (ii) variações da massa específica e temperatura do fluido no escoamento transitório podem ser desconsideradas perante as variações de vazão e pressão no mesmo; (iii) o escoamento é unidimensional (1D) e o perfil de velocidades no escoamento é assumida como pseudo-uniforme na seção transversal da tubulação; (iv) as perdas de carga para o regime transitório são calculadas a partir de formulações para o escoamento permanente; (v) o comportamento reológico da tubulação durante o escoamento é

considerado como elástico linear; (vi) a interação fluido-estrutura é negligenciada, desprezando-se os movimentos axiais; (vii) a tubulação é retilínea e uniforme, com seção transversal constante ao longo do comprimento e não há escoamentos laterais.

De uma forma geral, a velocidade de escoamento do fluido  $V$  é negligenciável se comparada à velocidade de propagação da onda  $c$ , ou seja, podem ser negligenciados os termos convectivos das equações 2.1 e 2.2. Assim sendo, estas equações podem ser simplificadas no par de equações 2.3 e 2.4:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{c^2}{gA} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{1}{gA} \frac{\partial Q}{\partial t} + h_f = 0 \quad (2.4)$$

O termo da velocidade da onda elástica,  $c$ , depende da compressibilidade do fluido, das condições externas à tubulação e das propriedades físicas da mesma. Considerando-se o modelo reológico elástico-linear do material da tubulação, o termo  $c$  pode ser dado por (Wylie e Streeter, 1978; Chaudhry, 2014):

$$c = \sqrt{\frac{\frac{K}{\rho}}{1 + \frac{\alpha DK}{e E}}} \quad (2.5)$$

onde  $E$  é o módulo de elasticidade do material das paredes da tubulação,  $K$  é o módulo de elasticidade do fluido,  $D$  é o diâmetro interno da tubulação,  $e$  é a espessura da parede da tubulação,  $\alpha$  é um parâmetro adimensional que depende da seção transversal da tubulação.

Os equacionamentos clássicos propostos consideram linearidade na relação tensão x deformação (equação 2.6) do material constituinte da tubulação, ou seja, a relação entre tensão e deformação do material é uma constante e igual a  $E_0$ , que é o módulo de elasticidade linear do material.

$$\sigma = E_0 \varepsilon \quad (2.6)$$

onde  $\varepsilon$  é a taxa de deformação causada pela aplicação da tensão  $\sigma$ .

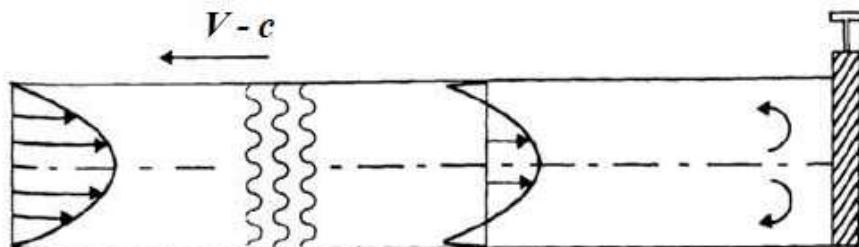
Ainda, em relação às perdas por atrito, os equacionamentos clássicos consideram um fator de atrito para escoamento permanente, ou seja, a perdas por atrito variável não foram consideradas na sua formulação.

Por conta das considerações básicas assumidas no par clássico das equações do transitório hidráulico, a inserção da influência do fator de atrito variável e da viscoelasticidade do material da tubulação acrescentará termos no par de equações já definido.

## 2.2 FATOR DE ATRITO NO TRANSITÓRIO HIDRÁULICO

De acordo com Covas (2003), devido à rápida mudança das condições de escoamento no interior da tubulação, durante o evento transitório, gerado com a repentina interrupção do fluxo de volume, o perfil instantâneo de velocidades varia, já não podendo ser aproximado por um perfil uniforme (Figura 2.1). Consequentemente, as perdas de energia devido à tensão de atrito nas paredes da tubulação não podem ser mais calculadas considerando-se um perfil de velocidades uniforme.

Figura 2.1 – Variação do perfil de velocidades no evento transiente.



Fonte: Covas (2003).

O termo  $h_f$ , presente nas equações 2.2 e 2.4, representa as perdas de carga devido ao atrito no escoamento. De acordo com Soares (2007, apud Zielke, 1968), este termo pode ser considerado como a soma de duas parcelas de perda, como mostra a equação 2.7.

$$h_f = h_{f_S} + h_{f_U} \quad (2.7)$$

Sendo que os termos  $h_{f_S}$  e  $h_{f_U}$  representam as perdas devido a um fator de atrito permanente (*steady*), e um fator variável (*unsteady*), respectivamente.

A parcela de perda de atrito permanente  $h_{fs}$  pode ser descrita pela equação 2.8 para regime turbulento e pela equação 2.9 para regime laminar.

$$h_{fs} = \frac{f_s}{2g} \frac{Q|Q|}{A^2} \quad (2.8)$$

$$h_{fs} = \frac{32\vartheta}{gD^2} \frac{Q}{A} \quad (2.9)$$

onde  $f_s$  é o fator de atrito de Darcy-Weisbach,  $D$  é o diâmetro interno da tubulação,  $n$  é um expoente da equação de perda de carga e  $\vartheta$  é a viscosidade cinemática do fluido.

O fator de atrito permanente ( $f_s$ ) da perda por  $h_{fs}$  foi apresentado por Swamee (1993) – Equação 2.10. Esta equação depende somente do número de Reynolds  $Re$ , dado pela equação 2.11, do diâmetro interno  $D$  da tubulação e da rugosidade média absoluta  $\epsilon$  da tubulação.

$$f_s = \left\{ \left( \frac{64}{Re} \right)^8 + 9,5 \left[ \ln \left( \frac{\epsilon}{3,7D} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) - \left( \frac{2500}{Re} \right)^6 \right]^{-16} \right\}^{0,125} \quad (2.10)$$

$$Re = \frac{VD}{\vartheta} \quad (2.11)$$

Alguns pesquisadores propuseram formulações que tentam representar a parcela da perda de carga referente à variável para  $h_{fu}$ . Entendendo como a tensão de cisalhamento ( $\tau_{wu}$ ) gerada a partir do fator de atrito variável existente a responsável pela perda de carga, três modelos que tentam quantificar essa tensão por atrito variável são apresentados. São estes os modelos de Vardy *et al.* (1993) - equação 2.12, de Vitkovský *et al.* (2000) - equação 2.13, e o modelo de Ramos *et al.* (2004) - equação 2.14.

$$\tau_{wu}(t) = \frac{4\mu}{D} [Y_{1,t} + Y_{2,t}] \quad (2.12)$$

$$\tau_{wu} = k \frac{\rho D}{4} \left[ \frac{\partial V}{\partial t} + c SGN(V) \left| \frac{\partial V}{\partial x} \right| \right] \quad (2.13)$$

$$\tau_{wu} = \frac{\rho D}{4} \left[ k_t \frac{\partial V}{\partial t} + k_x c SGN(V) \left| \frac{\partial V}{\partial x} \right| \right] \quad (2.14)$$

nas quais o termo  $\mu$  é a viscosidade dinâmica do fluido,  $Y_{i,t}$  são funções que dependem do fluido e das características do próprio escoamento,  $k$  é um coeficiente de amortecimento,  $\rho$  é a massa específica do fluido em escoamento,  $SGN(V)$  é o sinal do vetor velocidade média do escoamento,  $\left| \frac{\partial V}{\partial x} \right|$  é o módulo da variação  $\frac{\partial V}{\partial x}$ ,  $k_t$  é uma constante que influencia o

deslocamento de fase das ondas de pressão e  $k_x$  é uma constante que afeta a taxa de amortecimento dessas ondas.

Assim sendo, considerando-se as tensões de atrito apresentadas nas equações 2.12, 2.13 e 2.14, as parcelas de perda por atrito variável  $h_{fu}$ , apresentadas na equação 2.7, podem ser escritas da forma como se segue nas equações 2.15, 2.16 e 2.17.

$$h_{fu} \approx \frac{16}{gD^2} [Y_1 + Y_2] \quad (2.15)$$

$$h_{fu} = \frac{\kappa}{gA} \left[ \frac{\partial Q}{\partial t} + c \operatorname{SGN}(Q) \left| \frac{\partial Q}{\partial x} \right| \right] \quad (2.16)$$

$$h_{fu} = \frac{1}{gA} \left[ k_t \frac{\partial Q}{\partial t} + k_x c \operatorname{SGN}(Q) \left| \frac{\partial Q}{\partial x} \right| \right] \quad (2.17)$$

As funções  $Y_{i,t}$  presentes na equação 2.12 são apresentadas de uma maneira genérica na equação 2.18.

$$Y_{i,t} = (Y_{i,t-\Delta t}) e^{-\Psi B_i} + \frac{T_i}{A} (Q_t - Q_{t-\Delta t}) \quad (2.18)$$

em que  $\Psi$  é dado pela equação 2.19 e os termos  $B_i$  e  $T_i$  são constantes que dependem do escoamento e são obtidos a partir de curvas resultantes da equação 2.20.

$$\Psi = \frac{4\vartheta}{D^2} t \quad (2.19)$$

$$W(\Psi) = \frac{A^*}{\sqrt{\Psi}} e^{-B^* \Psi} \quad (2.20)$$

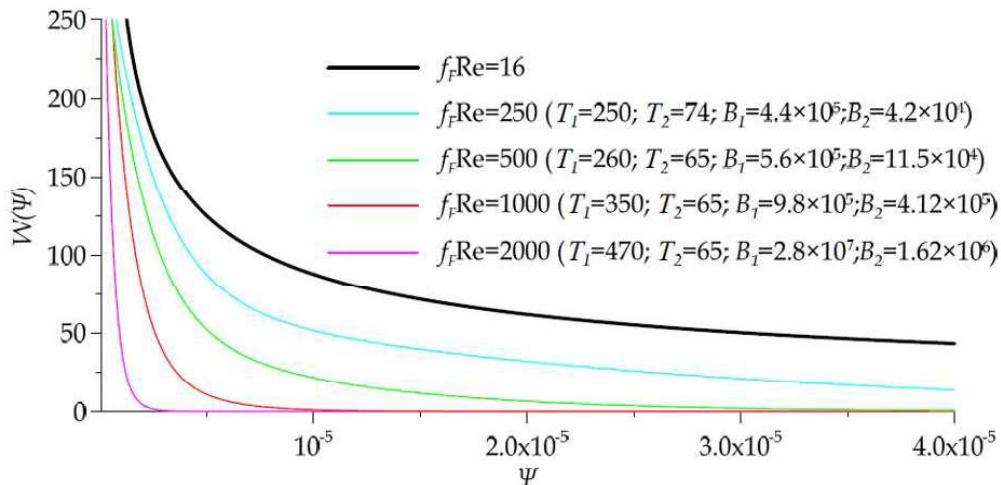
na qual  $A^* = \frac{1}{2\sqrt{\pi}}$  e

$$B^* = 0,135 Re^{\log\left(\frac{14,3}{Re^{0,05}}\right)} \quad (2.21)$$

As curvas geradas a partir da equação 2.20 são apresentadas na Figura 2.2 (COVAS, 2003), variando com o parâmetro  $f_F Re$ , sendo  $f_F$  o fator de atrito de Fanning, dado por:

$$f_F = \frac{1}{4} f_s \quad (2.22)$$

Figura 2.2 – Curvas  $W(\Psi)$  variando com  $f_F Re$ .



Fonte: Covas (2003).

Uma proposta para a constante de amortecimento  $k$  foi apresentada por Vardy e Brown (1996) da seguinte forma:

$$k = 2\sqrt{C^*} \quad (2.23)$$

em que  $C^*$  é um coeficiente de decaimento que depende do número de Reynolds  $Re$ , como apresentado na equação 2.24:

$$C^* = \frac{7,41}{Re \log\left(\frac{14,3}{Re^{0,05}}\right)} \quad (2.24)$$

## 2.3 VISCOELASTICIDADE DE CONDUTOS PLÁSTICOS

Em tubulações metálicas e de concreto, embora o modelo elástico-linear descrevesse bem o comportamento entre pressão e deformação, em tubulações de PVC, de acordo com Larson e Jonsson (1991), a resposta dos tubos apresentava comportamento não-linear. Foi verificado que o comportamento viscoelástico dos polímeros possui uma influência significativa no comportamento das pressões durante o efeito transitório, gerando picos súbitos de pressão e uma dissipação e dispersão maior das ondas de pressão.

O comportamento viscoelástico da tubulação pode ser incorporado à modelagem do transitório hidráulico de duas formas, sendo uma a partir da celeridade dependente da frequência ou a partir da adição de um termo nas equações de continuidade (COVAS, 2003).

A ideia de que o comportamento viscoelástico é uma função dependente do tempo é o conceito atrás da “celeridade dependente da frequência”, mas no domínio da frequência. O módulo de elasticidade  $E_0$  pode ser dado pelo inverso da função de fluência  $J$  (deve ser notado que na condição de independência do tempo, a função de fluência é tida como o inverso do módulo de elasticidade,  $J_0 = 1/E_0$ ).

A adição de um termo viscoelástico está relacionado à reologia polimérica dos materiais constituintes da tubulação, os quais apresentam duas respostas à tensão; sendo uma resposta instantânea elástica – que é levada em conta na celeridade da onda de pressão – e uma resposta retardada, dada pelo termo adicional incorporado na equação da continuidade, que depende do tempo.

Ao se acrescentar a influência da viscoelasticidade ao par de equações clássicas do transitório hidráulico, a equação 2.1 pode ser reescrita da forma apresentada na equação 2.25, que foi proposta inicialmente por Rieutord e Blanchard (1979) e Gally, Güney e Rieutord (1979).

$$\frac{dH}{dt} + \frac{c^2}{gA} \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{2c^2}{g} \frac{d\varepsilon_r}{dt} = 0 \quad (2.25)$$

sendo  $\varepsilon_r$  a parcela de deformação lenta.

A respeito da equação 2.25, são feitas as seguintes considerações: (i) o material da tubulação possui comportamento viscoelástico linear para pequenas deformações; (ii) o material da tubulação é homogêneo e isotrópico; (iii) o material da tubulação tem um coeficiente de Poisson constante e igual a  $\nu$ , o que faz o comportamento mecânico ser dependente apenas da função fluência  $J(t)$ .

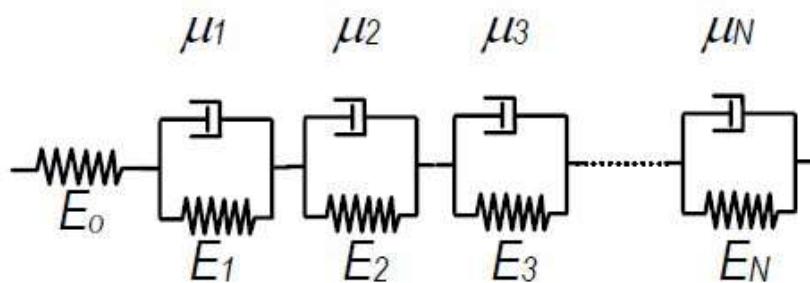
Analizando-se a taxa de deformação, Covas et. al. (2005) propôs a separação da mesma em duas parcelas, de acordo com a equação 2.26.

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_e(t) + \varepsilon_r(t) \quad (2.26)$$

sendo  $\varepsilon_e(t)$  a parcela de taxa de deformação linear instantânea (elástica). O desenvolvimento das equações das duas parcelas de taxa de deformação está disponível em Covas (2003).

Covas (2003) ainda apresenta o modelo mecânico para determinação da expressão analítica da função fluênciia  $J(t)$ , que é baseada em uma sequência em série de pistões com viscosidade  $\mu_N$  e molas com módulo de elasticidade  $E_N$ , para  $N = 0, 1, 2, \dots$ , ligadas em paralelo. Esse modelo proposto é chamado de Modelo de Kelvin-Voigt generalizado de um sólido viscoelástico e a Figura 2.3 esquematiza de forma geral o arranjo dos elementos do modelo.

Figura 2.3 – Esquema do modelo Kelvin-Voigt Generalizado.



Fonte: Covas (2003).

O modelo de Kelvin-Voigt generalizado define a função de fluênciia como apresentado na equação 2.27.

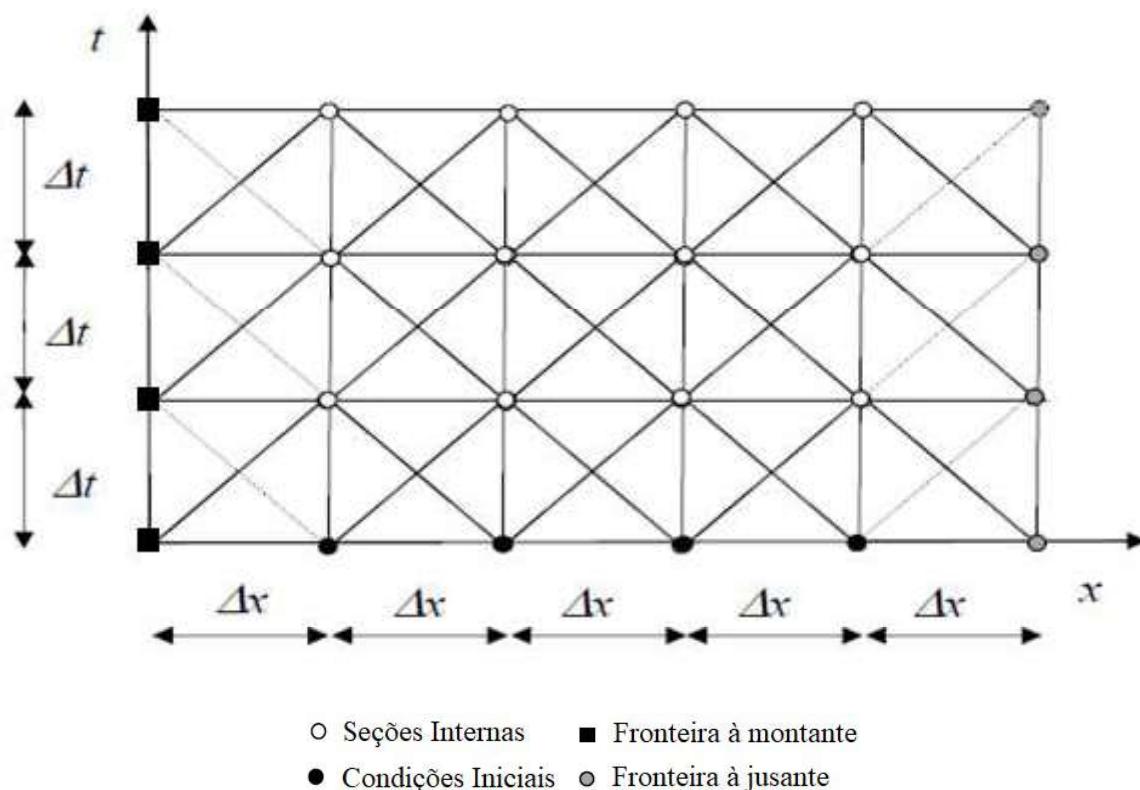
$$J(t) = J_0 + \sum_{k=1}^N J_k \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau_k}} \right) \quad (2.27)$$

onde  $J_0$  é a fluênciia da primeira mola do modelo, definida como  $J_0 = 1/E_0$ ;  $J_k$  é a fluênciia da  $k$ -ésima mola do modelo, definida como  $J_k = 1/E_k$ ;  $E_k$  é o módulo de elasticidade da  $k$ -ésimo elemento de mola;  $\tau_k$  é o tempo de retardo do pistão do  $k$ -ésimo elemento,  $\tau_k = \mu_k/E_k$ ;  $\mu_k$  é a viscosidade do pistão do  $k$ -ésimo elemento do modelo.

## 2.4 MÉTODO DAS CARACTERÍSTICAS

Uma ferramenta utilizada para se resolver conjuntos de equações diferenciais parciais, como é o caso das equações 2.4 e 2.25, é o Método das Características – MOC (*Method of Characteristics*). O MOC consiste em discretizar espacial e temporalmente o problema analisado, criando uma malha, no caso deste trabalho, retangular, descrita no espaço e no tempo, em intervalos  $\Delta x$  e  $\Delta t$ , como ilustra a Figura 2.4.

Figura 2.4 – Malha característica do MOC.

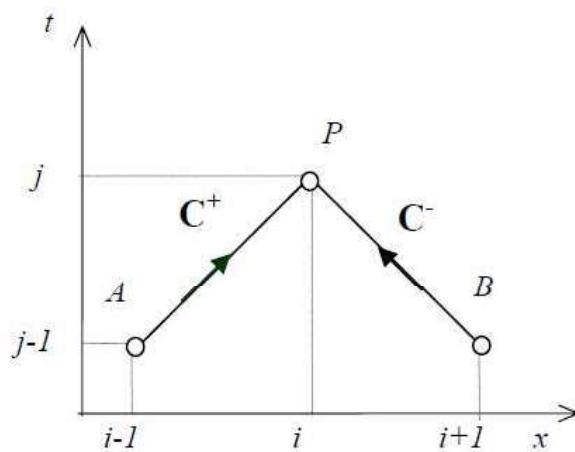


Fonte: Covas (2003).

Os valores determinados pelo método são calculados nos pontos da malha onde os intervalos de tempo e espaço se cruzam. Como representado na Figura 2.4, os quadrados pretos representam os pontos onde as condições de fronteira regem os valores a montante do sistema (no caso deste trabalho, um reservatório de nível constante), os pontos circulares pretos estão no tempo  $t = 0$ , ou seja, nas condições iniciais pré-definidas para o problema (geralmente, o escoamento permanente). Os círculos em cinza indicam os pontos onde as condições de fronteira à jusante governam os resultados (no caso deste trabalho, uma válvula descarregando para a atmosfera) e os círculos em branco apresentam os pontos internos do sistema, no caso, os pontos internos da tubulação.

A discretização da malha pelo MOC se dá através de duas linhas características distintas: as características positiva e a negativa, conforme a Figura 2.5. A resolução pelo MOC para as equações diferenciais parciais gera um par de soluções para o problema, sendo uma solução válida somente ao longo da característica positiva da malha discretizada e outra ao longo da característica negativa.

Figura 2.5 – Malha característica do MOC detalhada.



Fonte: Covas (2003).

Assim, para determinar o valor da variável em análise do ponto P a partir dos valores das variáveis do ponto A, utiliza-se a solução característica positiva, e a partir do ponto B, a solução característica negativa.

## CAPÍTULO 3

### METODOLOGIA

Neste capítulo, o método utilizado de resolução das equações apresentadas na Revisão Bibliográfica é utilizado para a resolução das mesmas, reunindo os equacionamentos envolvidos e descrevendo o problema escolhido para análise do fator de atrito variável e viscoelasticidade da tubulação – sistema do *Imperial College* (COVAS, 2003) – juntamente com suas condições de contorno. É apresentado, também, um quadro resumo com as equações utilizadas no desenvolvimento da rotina computacional em C++.

#### 3.1 RESOLUÇÃO DO PAR DE EQUAÇÕES DIFERENCIAIS

Covas (2003) utiliza o MOC para transformar o par de equações 2.4 e 2.25 em um par de equações diferenciais ordinárias válidas ao longo das características positiva  $C^+$  e negativa  $C^-$  completas, na malha característica, conforme apresentado na equação 3.1.

$$C^\pm: \frac{dH}{dt} \pm \frac{c}{gA} \frac{dQ}{dt} + \frac{2c^2}{g(V \pm c)} \left( V \frac{d\varepsilon_r}{dt} \pm c \frac{\partial \varepsilon_r}{\partial t} \right) \pm ch_f = 0 \quad (3.1)$$

válidas em  $dx/dt = V \pm c$ , na qual o operador derivada total é descrito como  $d/dt = \partial/\partial t + (V \pm c) \partial/\partial x$ .

Usando-se as derivadas implícitas de primeira ordem, as características apresentadas na equação 3.1 são resolvidas na malha do MOC e chega-se na solução da equação 3.2.

$$\begin{aligned} C^\pm: & [H_{i,j} - H_{i\mp 1,j-1}] \pm \frac{c}{gA} [Q_{i,j} - Q_{i\mp 1,j-1}] \pm c\Delta t_{i,j\mp 1} h_f + \\ & + \frac{2c^2/g}{\frac{Q_{i\mp 1,j-1}}{A} \pm c} \left[ \frac{Q_{i\mp 1,j-1}}{A} \left( \varepsilon_r^{i,j} - \varepsilon_r^{i\mp 1,j} \right) \pm c \left( \frac{\partial \varepsilon_r}{\partial t} \right)_{i,j\mp 1} \Delta t_{i,j\mp 1} \right] = 0 \end{aligned} \quad (3.2)$$

válida em  $\Delta x/\Delta t = V \pm c$ .

De uma forma geral, a velocidade do escoamento  $V$  pode ser negligenciada, de modo que  $dx/dt$  pode ser tomado como  $\pm c$ . Isso é equivalente a dizer que o termo convectivo das equações 3.1 e 3.2 são negligenciados, levando às equações simplificadas 3.3 e 3.4.

$$C^\pm: \frac{dH}{dt} \pm \frac{c}{gA} \frac{dQ}{dt} + \frac{2c^2}{g} \left( \frac{\partial \varepsilon_r}{\partial t} \right) \pm ch_f = 0 \quad (3.3)$$

$$C^\pm: [H_{i,j} - H_{i\mp 1,j}] \pm \frac{c}{gA} [Q_{i,j} - Q_{i\mp 1,j}] \pm c\Delta t h_f + \frac{2c^2\Delta t}{g} \left( \frac{\partial \varepsilon_r}{\partial t} \right)_{i,j\mp 1} = 0 \quad (3.4)$$

O par de características positivas e negativas apresentadas na equação 3.4 constituem a malha característica, como mostra na Figura 2.4 (COVAS, 2003).

Covas (2003) resolveu as equações 3.4<sup>+</sup> e 3.4<sup>-</sup> e encontrou duas equações para a vazão  $Q_{i,j}$ , sendo uma para a característica positiva da malha e outra para a característica negativa, apresentadas nas equações 3.5 e 3.6:

$$C^+: Q_{i,j} = C_P - C_{a+} H_{i,j} \quad (3.5)$$

$$C^-: Q_{i,j} = C_N + C_{a-} H_{i,j} \quad (3.6)$$

nas quais os coeficientes  $C_N$ ,  $C_{a+}$ ,  $C_P$  e  $C_{a-}$  são conhecidos quando aplicados na posição  $i$  e no tempo  $j$ . Esses coeficientes dependem das formulações utilizadas para descrever os fatores de atrito variáveis adotadas (Vardy *et al.*, 1993; Vitkovský *et al.*, 2000; Ramos *et al.*, 2004) e do modelo mecânico utilizado para descrever o comportamento viscoelástico do material do conduto (Rachid *et al.*, 1992). As expressões para esses coeficientes são as seguintes:

$$C_P = \frac{Q_{i-1,j-1} + BH_{i-1,j-1} + C'_{P1} + C''_{P1} + C'''_{P1}}{1 + C'_{P2} + C''_{P2}} \quad (3.7)$$

$$C_N = \frac{Q_{i+1,j-1} - BH_{i+1,j-1} + C'_{N1} + C''_{N1} + C'''_{N1}}{1 + C'_{N2} + C''_{N2}} \quad (3.8)$$

$$C_{a+} = \frac{B + C'''_{P2}}{1 + C'_{P2} + C''_{P2}} \quad (3.9)$$

$$C_{a-} = \frac{B + C'''_{N2}}{1 + C'_{N2} + C''_{N2}} \quad (3.10)$$

Os coeficientes ', '' e ''' se referem ao fator de atrito permanente, ao fator de atrito variável e ao componente do comportamento viscoelástico do material da tubulação, respectivamente.

O coeficiente  $B$  é uma função das características físicas do fluido e da tubulação:

$$B = \frac{gA}{c} \quad (3.11)$$

e  $R$  é o coeficiente de resistência da tubulação definida (equação 3.12).

$$R = \frac{f_s}{2DA} \quad (3.12)$$

Ao longo da tubulação discretizada, na seção  $i$  e no tempo  $j$ , a vazão  $Q_{i,j}$  pode ser calculada de acordo com as equações 3.5 e 3.6 e a altura piezométrica  $H_{i,j}$  a partir da equação 3.13.

$$H_{i,j} = \frac{C_p - C_n}{C_{a+} + C_{a-}} \quad (3.13)$$

Os termos  $C'_{P1,2}$ ,  $C''_{P1,2}$ ,  $C'''_{P1,2}$ ,  $C'_{N1,2}$  e  $C''_{N1,2}$ ,  $C'''_{N1,2}$  variam de acordo com os termos permanentes e variáveis do fator de atrito. Para a parcela permanente é utilizada acurácia de primeira ordem e para a parcela variável, cada um dos três modelos apresentados possui uma formulação. Os equacionamentos são apresentados no Quadro 3.1 (Covas, 2003; Soares, 2007).

Quadro 3.1 – Valores dos termos  $C'_{P1,2}$ ,  $C''_{P1,2}$ ,  $C'''_{P1,2}$ ,  $C'_{N1,2}$  e  $C''_{N1,2}$ ,  $C'''_{N1,2}$ .

| <b>Fator de Atrito Permanente</b>           |  |
|---|--|
| Acurácia de<br>primeira ordem               | $C'_{P1} = -R\Delta_t  Q_{i-1,j-1}  Q_{i-1,j-1}$   |
|   | $C'_{N1} = -R\Delta_t  Q_{i+1,j-1}  Q_{i+1,j-1}$   |
|   | $C'_{P2} = C'_{N2} = 0$  |
| <b>Fator de atrito variável</b>             |  |
| Vardy <i>et al.</i><br>(1993)               | $C''_{P1} = C''_{N1} = -gA\Delta_t \frac{16\vartheta}{gD^2} \sum_{k=1}^2 \left( e^{-B_k \frac{4\vartheta}{D^2} \Delta_t} Y_{k,j-1} - \frac{T_k}{A} Q_{i,j-1} \right)$<br>$C''_{P2} = C''_{N2} = gA\Delta_t \frac{16\vartheta}{gD^2} \sum_{k=1}^2 \left( \frac{T_k}{A} \right)$   |
| Vitkovský <i>et al.</i><br>(2000)           | $C''_{P1} = k\theta Q_{i,j-1} - k(1-\theta)(Q_{i-1,j-1} - Q_{i-1,j-2}) - kSGN(Q_{i-1,j-1}) Q_{i,j-1} - Q_{i-1,j-1} $<br>$C''_{N1} = k\theta Q_{i,j-1} - k(1-\theta)(Q_{i+1,j-1} - Q_{i+1,j-2}) - kSGN(Q_{i+1,j-1}) Q_{i,j-1} - Q_{i+1,j-1} $<br>$C''_{P2} = C''_{N2} = k\theta$  |
| Ramos <i>et al.</i><br>(2004)               | $C''_{P1} = k_t\theta Q_{i,j-1} - k_t(1-\theta)(Q_{i-1,j-1} - Q_{i-1,j-2}) - k_xSGN(Q_{i-1,j-1}) Q_{i,j-1} - Q_{i-1,j-1} $<br>$C''_{N1} = k_t\theta Q_{i,j-1} - k_t(1-\theta)(Q_{i+1,j-1} - Q_{i+1,j-2}) - k_xSGN(Q_{i+1,j-1}) Q_{i,j-1} - Q_{i+1,j-1} $<br>$C''_{P2} = C''_{N2} = k_t\theta$  |
| <b>Reologia da parede da tubulação</b>      |  |
| <i>Elástico-Linear</i>                      | $C'''_{P1} = C'''_{P2} = 0$ $C'''_{N1} = C'''_{N2} = 0$  |
| <i>Viscoelástico-Linear</i><br>Covas (2003) | $C'''_{P1} = -2cA\Delta t C_0 \sum_{k=1...N} \left\{ \frac{\tau_k}{\Delta t} \left( 1 - e^{-\Delta t/\tau_k} \right) \right\}$<br>$C'''_{N1} = -2cA\Delta t C_0 \sum_{k=1...N} \left\{ -C_0 \frac{J_k}{\tau_k} H_{i,0} + C_0 \frac{J_k}{\tau_k} \left[ 1 - \left( 1 - e^{-\Delta t/\tau_k} \right) \frac{\tau_k}{\Delta t} \right] H_{i,0} \right. \\ \left. - C_0 \frac{J_k}{\tau_k} \left[ \left( 1 - e^{-\Delta t/\tau_k} \right) \frac{\tau_k}{\Delta t} - e^{-\Delta t/\tau_k} \right] (H_{i,j-1} - H_{i,0}) - \frac{e^{-\Delta t/\tau_k}}{\tau_k} \varepsilon_{r(i,j-1)} \right\}$<br>$C'''_{P2} = -C'''_{P1}$ $C'''_{N2} = +C'''_{N1}$ $C_0 = \frac{\alpha_0 D_0 \gamma}{2e_0}$ |

Fonte: Covas (2003) e Soares (2007).

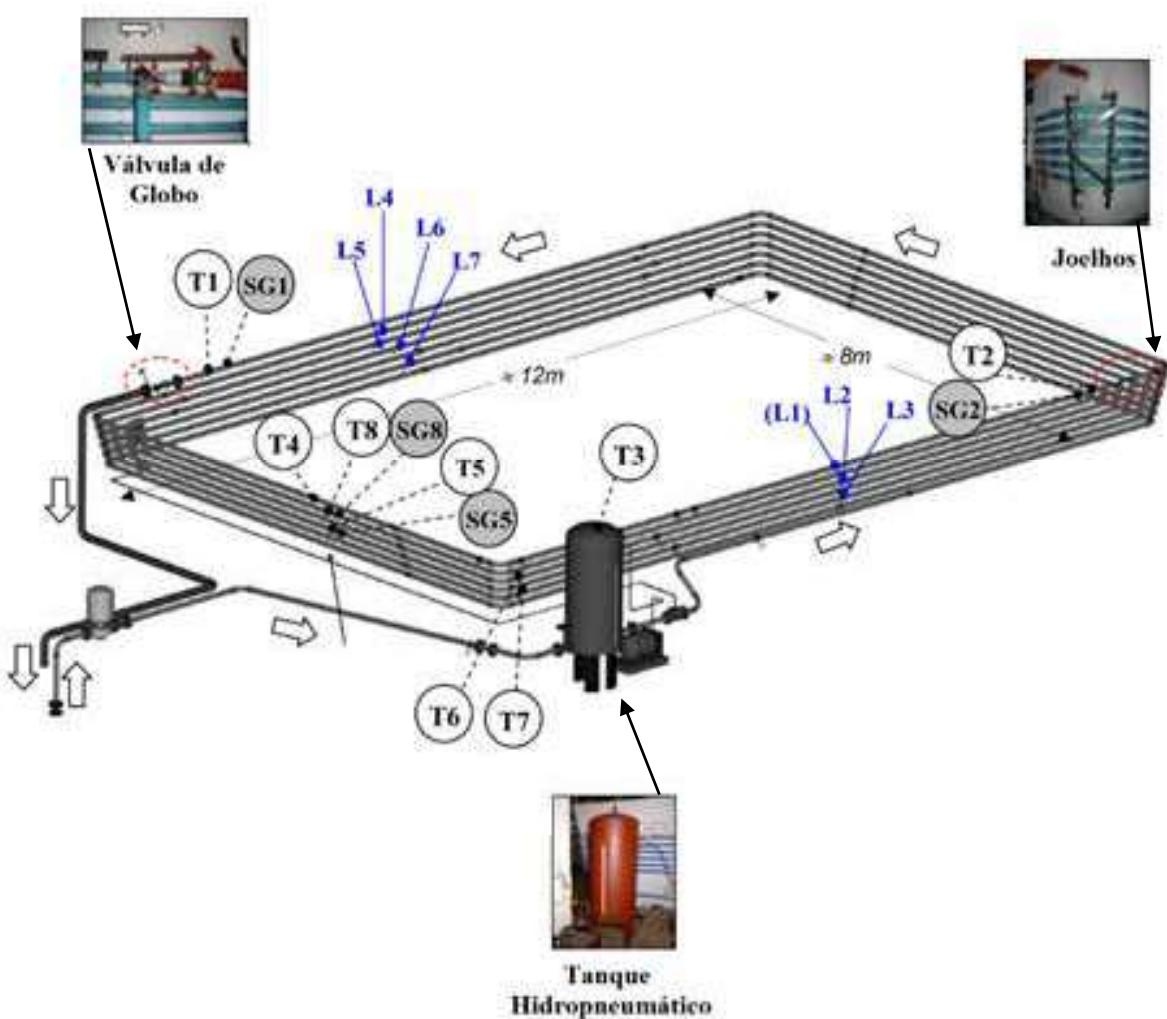
No Quadro 3.1:

$$Y_{k,j-1} = (Y_{k,j-2})e^{-\Psi B_k} + \frac{T_k}{A}(Q_{i,j-1} - Q_{i,j-2}) \quad (3.14)$$

### 3.2 SISTEMA IMPERIAL COLLEGE E CONDIÇÕES DE CONTORNO

Covas (2003) realizou ensaios experimentais no Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do *Imperial College* em Londres, Reino Unido, para validação do modelo viscoelástico proposto e o modelo experimental utilizado no presente trabalho é o sistema do *Imperial College*. Tal modelo é representado pela Figura 3.1.

Figura 3.1 – Sistema *Imperial College*.



Fonte: Adaptado de Covas (2003).

O sistema é composto de um reservatório hidropneumático de nível igual a  $H_R$  a montante, tubulação, que faz 7 voltas em uma região retangular de extensões 8 e 12 m, uma válvula de globo a jusante com a finalidade de controlar a vazão e gerar eventos transitórios e alguns pontos com transdutores (T) de pressão, para e medir os valores das pressões, e com sensores

de deformação (*Strain Gauges - SG*) para se determinar os valores das deformações ao longo da tubulação.

A discretização da malha, para aplicação do MOC, ocorrerá ao longo do sistema apresentado. Para essa discretização, são apresentadas três situações onde as condições de contorno variam entre si, sendo elas: ponto extremo a montante (reservatório de nível fixo), pontos internos da tubulação e ponto extremo a jusante (válvula com descarga livre para a atmosfera). Os equacionamentos da vazão ( $Q_{i,j}$ ) e altura piezométrica ( $H_{i,j}$ ) são apresentados a seguir para cada uma das três situações.

Para o ponto extremo a montante (reservatório de nível fixo), a vazão  $Q_{i,j}$  segue a equação característica positiva 3.15 e a altura piezométrica  $H_{i,j}$  é dada pela equação 3.16.

$$Q_{i,j} = C_P - C_{a+}H_{i,j} \quad (3.15)$$

$$H_{i,j} = H_R \quad (3.16)$$

Para os pontos internos, a vazão  $Q_{i,j}$  segue as equações 3.5 e 3.6 e a altura piezométrica  $H_{i,j}$  é dada pela equação 3.13.

Para a terceira e última situação, ponto extremo a jusante (válvula com descarga livre), a vazão  $Q_{i,j}$  segue a equação 3.17 e a altura piezométrica  $H_{i,j}$  é dada pela equação 3.18.

$$Q_{i,j} = \frac{1}{2} \left( \sqrt{C_V^2 + 4C_V C_P} - C_V \right) \quad (3.17)$$

$$H_{i,j} = \frac{C_P - Q_{i,j}}{C_{a+}} \quad (3.18)$$

em que os coeficientes  $C_V$  e  $\beta$  podem ser calculados da seguinte forma:

$$C_V = \frac{(Q_{zero}\beta)^2}{BH_{zero}} \quad (3.19)$$

$$\beta = 1 - \frac{t}{t_C}, \quad \beta \geq 0 \quad (3.20)$$

sendo  $Q_{zero}$  e  $H_{zero}$  a vazão e a altura piezométrica, respectivamente, no regime permanente,  $\beta$  o coeficiente de abertura momentânea da válvula,  $t_C$  o tempo de fechamento da válvula e  $t$  o tempo instantâneo atual a partir do início de fechamento da válvula.

Para a análise em um tempo igual ou inferior ao tempo de fechamento completo da válvula, o termo  $C_V$  é dado pela equação 3.19. Caso o tempo analisado seja maior que  $t_C$ , tanto o coeficiente  $\beta$  como  $C_V$  são nulos, o que implica uma vazão  $Q_{i,j}$  nula na saída da válvula uma vez que a mesma se encontra totalmente fechada.



## CAPÍTULO 4

### RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, são apresentadas as simulações realizadas com a rotina computacional desenvolvida, bem como os parâmetros de cada formulação proposta para os modelos analisados da literatura para o fator de atrito variável e a viscoelasticidade de condutos durante o efeito transitório.

#### **4.1 DADOS DO IMPERIAL COLLEGE**

Todas as simulações realizadas para os modelos teóricos apresentados neste trabalho consideraram o sistema montado no *Imperial College*, no Reino Unido, por Covas (2003). Os parâmetros apresentados na Quadro 4.1 foram utilizados nas análises experimentais realizadas e nas simulações deste trabalho, como dados gerais de entrada.

Quadro 4.1 – Valores de entrada para simulações nas rotinas computacionais desenvolvidas.

|   |   |  |
|---|---|--|
| <b><math>g = 9,806 \text{ m/s}^2</math></b>     | <b><math>Q_{zero} = 1,008 \text{ L/s}</math></b>      | <b><math>D = 50,60 \text{ mm}</math></b> |
| <b><math>H_R = 45,50 \text{ m}</math></b>       | $L = 271,60 \text{ m}$                                | $c = 395,0 \text{ m/s}$                  |
| <b><math>\epsilon = 0,03 \text{ mm}</math></b>  | $\vartheta = 1,0 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ | $e = 6,25 \text{ mm}$                    |
| <b><math>v = 0,40</math></b>                    | $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$                          | $\Delta x = 0,40 \text{ m}$              |
| <b><math>\Delta t = 1,012 \text{ ms}</math></b> | $TV_{inicial} = 0,2005 \text{ s}$                     | $TV_{final} = 0,3018 \text{ s}$          |

Fonte: Covas (2003).

sendo  $TV_{inicial}$  e  $TV_{final}$  os tempos de início e de final de fechamento considerados para a válvula. Com os valores da discretização da malha de  $\Delta x$  e  $\Delta t$ , foram obtidas 680 seções no espaço  $i$  e 10000 seções no tempo  $j$ .

O coeficiente de abertura da válvula  $\beta$  não foi linear como apresenta a equação 3.20. Com os dados experimentais obtidos por Covas (2003), foi realizada uma regressão polinomial (com  $R^2$  de 0,999) e a função  $\beta$  pode ser escrita da seguinte forma:

$$\beta = 4320,50 \cdot t^4 - 4045,70 \cdot t^3 + 1366,60 \cdot t^2 - 205,33 \cdot t + 12,855 \quad (4.1)$$

## 4.2 SIMULAÇÕES REALIZADAS

Primeiramente, foram realizadas simulações com o modelo de Covas (2003) considerando o material da tubulação sendo o PEAD, que foi calibrado através do experimento do *Imperial College* com três elementos do modelo Kelvin-Voigt, sendo os valores das constantes do modelo iguais a  $J_0 = 0,690 \text{ GPa}^{-1}$ ,  $J_1 = 0,104 \text{ GPa}^{-1}$  e  $\tau_1 = 0,050 \text{ s}$ ,  $J_2 = 0,124 \text{ GPa}^{-1}$  e  $\tau_2 = 0,50 \text{ s}$  e  $J_3 = 0,410 \text{ GPa}^{-1}$  e  $\tau_3 = 10,0 \text{ s}$  e negligenciando a perda por atrito variável. Com esses valores foram simulados a partir da rotina computacional os valores das pressões durante o transitório hidráulico no sistema proposto para os pontos dos transdutores de pressão  $T_1$ ,  $T_5$  e  $T_8$ . Os resultados das simulações foram comparados com os valores obtidos experimentalmente e estão apresentados nos Gráficos 4.1, 4.2 e 4.3.

Para o modelo de Vardy *et al.* (1993), foram realizadas duas simulações para os parâmetros  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $B_1$  e  $B_2$ , de acordo com Figura 2.2. O valor de  $f_F Re$  para o sistema do *Imperial College* proposto resultou em 164,3, que é um valor inferior ao mínimo explorado pela Figura 2.2 e, portanto, os parâmetros supracitados devem ser utilizados considerando uma faixa de validade para cada valor de  $f_F Re$ ; assim sendo, a faixa inicial do valor de 250 foi tomada como a mais próxima do comportamento inicial, por se tratar do menor valor disponível. Vale ressaltar que, durante os transitórios hidráulicos, as curvas  $f_F Re$  são modificadas em função das condições de escoamento para cada passo de tempo, ou seja, os valores dos parâmetros  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $B_1$  e  $B_2$  são alterados. Com essas simulações, foram gerados os Gráficos 4.4 e 4.5.

Para o modelo de Vitkovský *et al.* (2000), o valor calibrado da constante  $k$  para o material cobre, de acordo com Soares *et al.* (2007), vale 0,016, e para o PEAD vale 0,048. Desta forma, foram realizadas simulações considerando  $k$  para o cobre e para o PEAD e, também, igual a 0,05, 0,10, 0,20, 0,30 e 0,40. Com as simulações realizadas, foram gerados os Gráficos 4.6, 4.7 e 4.8.

Para o modelo de Ramos *et al.* (2004), para o material cobre,  $k_x = 0,016$  e a recomendação é que  $k_t \approx 10\% k_x$  e  $\theta = 1$ . Desta forma, foram realizadas simulações para a situação onde  $k_t = 10\% k_x$ , sendo  $k_t$  igual a 0,016 e, também, para o PEAD sendo  $k_t$  0,048. Também, foram feitas simulações para  $k_x = 10\% k_t$ , sendo  $k_t$  igual a 0,016 e 0,048 e uma simulação com  $k_x = 0,2$  e  $k_t = 0,0$ . Com as simulações realizadas foram gerados os Gráficos 4.9, 4.10, 4.11, 4.12 e 4.13 e 4.14.

Com os resultados das simulações realizadas para os modelos descritos, foi gerado o Gráfico 4.15, com os modelos de Vardy *et al.* (1993), Vitkoviský *et al.* (2000) para  $k = 0,048$  e Ramos *et al.* (2004) para  $k_t = 10\%k_x$  e com  $k_t = 0,048$ , para PEAD.

Os Gráficos 4.4 a 4.15 foram plotados com resultados sem a implementação do modelo viscoelástico de Covas (2003).

Com os parâmetros de viscoelasticidade para o PEAD, foram plotados os Gráficos 4.16, 4.17 e 4.18. O Gráfico 4.16 apresenta os valores da simulação para o modelo de Covas (2003) sem nenhum tipo de perda por atrito. Já o Gráfico 4.17 apresenta os valores das simulações de Covas (2003) com e sem atrito permanente, negligenciando o fator de atrito variável. E o Gráfico 4.18 apresenta os resultados obtidos das simulações para o modelo viscoelástico sem fator de atrito variável na extremidade à jusante da tubulação (válvula) e na metade da sua extensão.

Foram realizadas, também, simulações para o modelo de Covas (2003) considerando-se o fator de atrito variável. Pela consideração conjunta da viscoelasticidade e do fator de atrito variável, segundo Covas *et al.* (2005), os novos valores das constantes do modelo viscoelástico são iguais a  $J_0 = 0,70 \text{ GPa}^{-1}$ ,  $J_1 = 0,0801 \text{ GPa}^{-1}$  e  $\tau_1 = 0,050 \text{ s}$ ,  $J_2 = 0,1101 \text{ GPa}^{-1}$  e  $\tau_1 = 0,50 \text{ s}$  e  $J_3 = 0,5906 \text{ GPa}^{-1}$  e  $\tau_1 = 10,0 \text{ s}$ . Com esses parâmetros, foram simuladas as variações de pressão devido ao transitório para o modelo viscoelástico considerando em conjunto os modelos de fator de atrito variável descritos neste trabalho. Com os dados das simulações, foram gerados os Gráficos 4.19, 4.20, 4.21 e 4.22.

### 4.3 GRÁFICOS GERADOS

Nas páginas seguintes são apresentados os gráficos gerados a partir das simulações realizadas e descritas anteriormente.

GRÁFICO 4.1 – Resultados numéricos do *Imperial College* e dados experimentais gerados para o ponto do transdutor de Pressão T8.

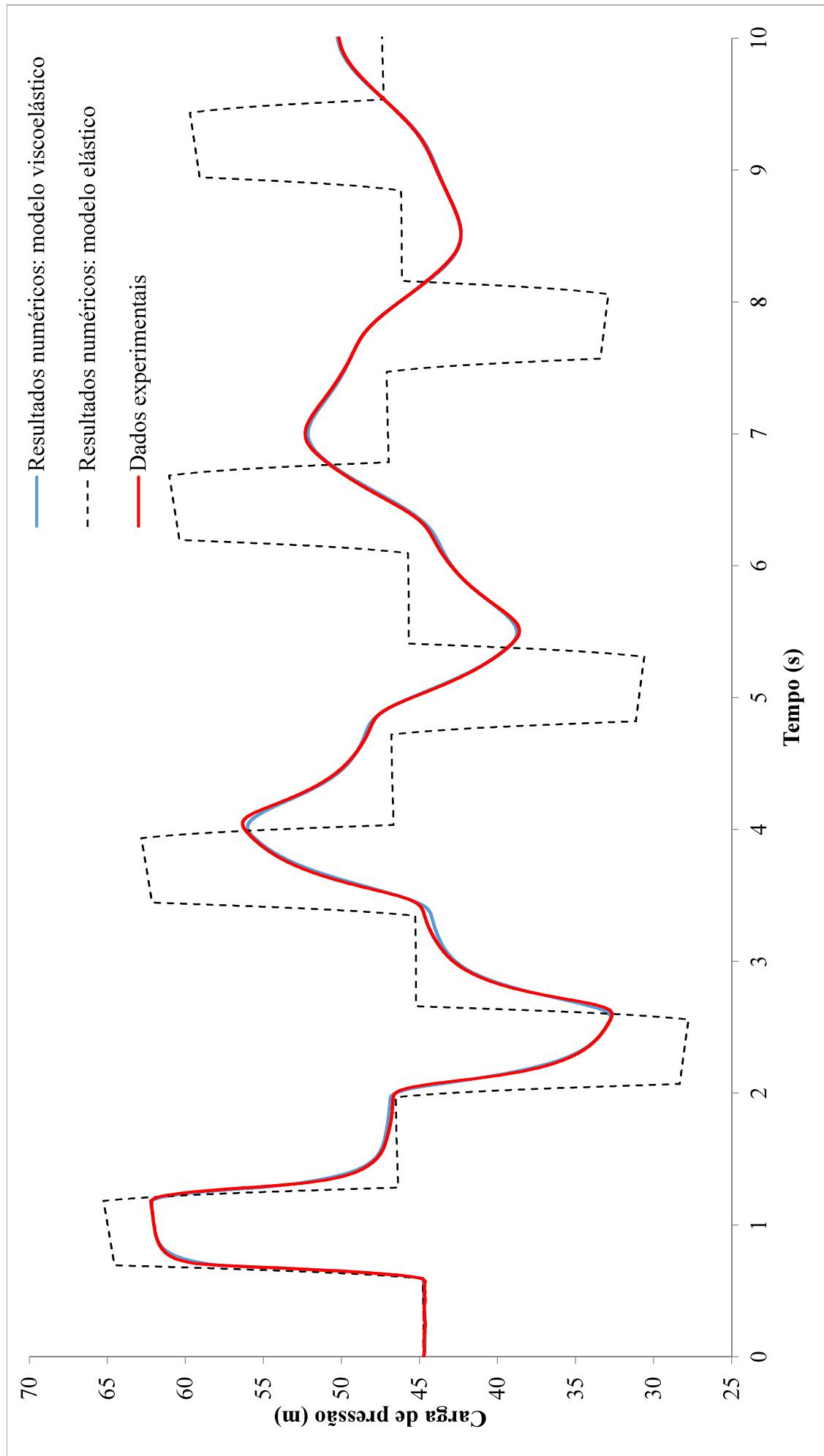


GRÁFICO 4.2 – Resultados numéricos do *Imperial College* e dados experimentais gerados para o ponto do transdutor de Pressão T5.

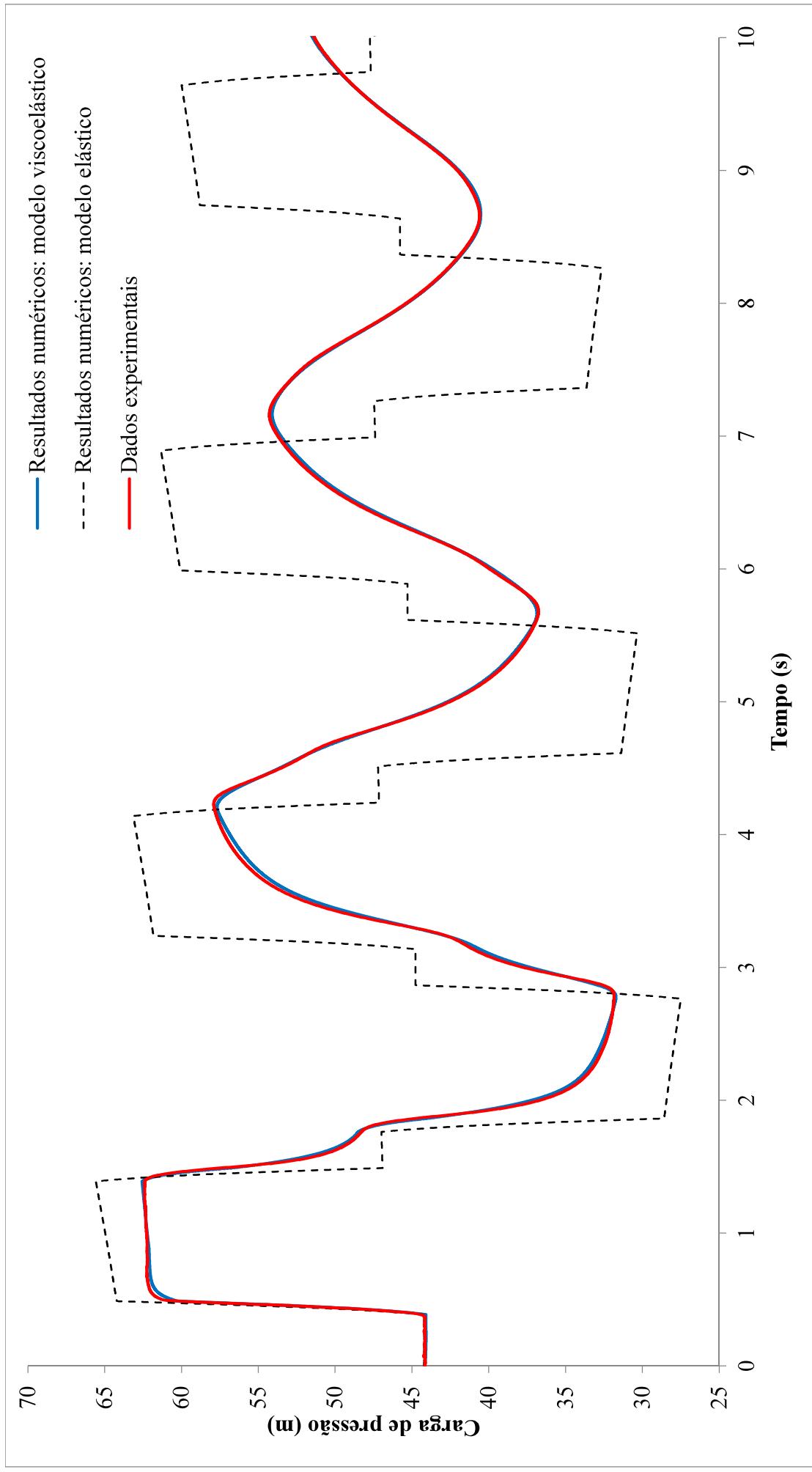


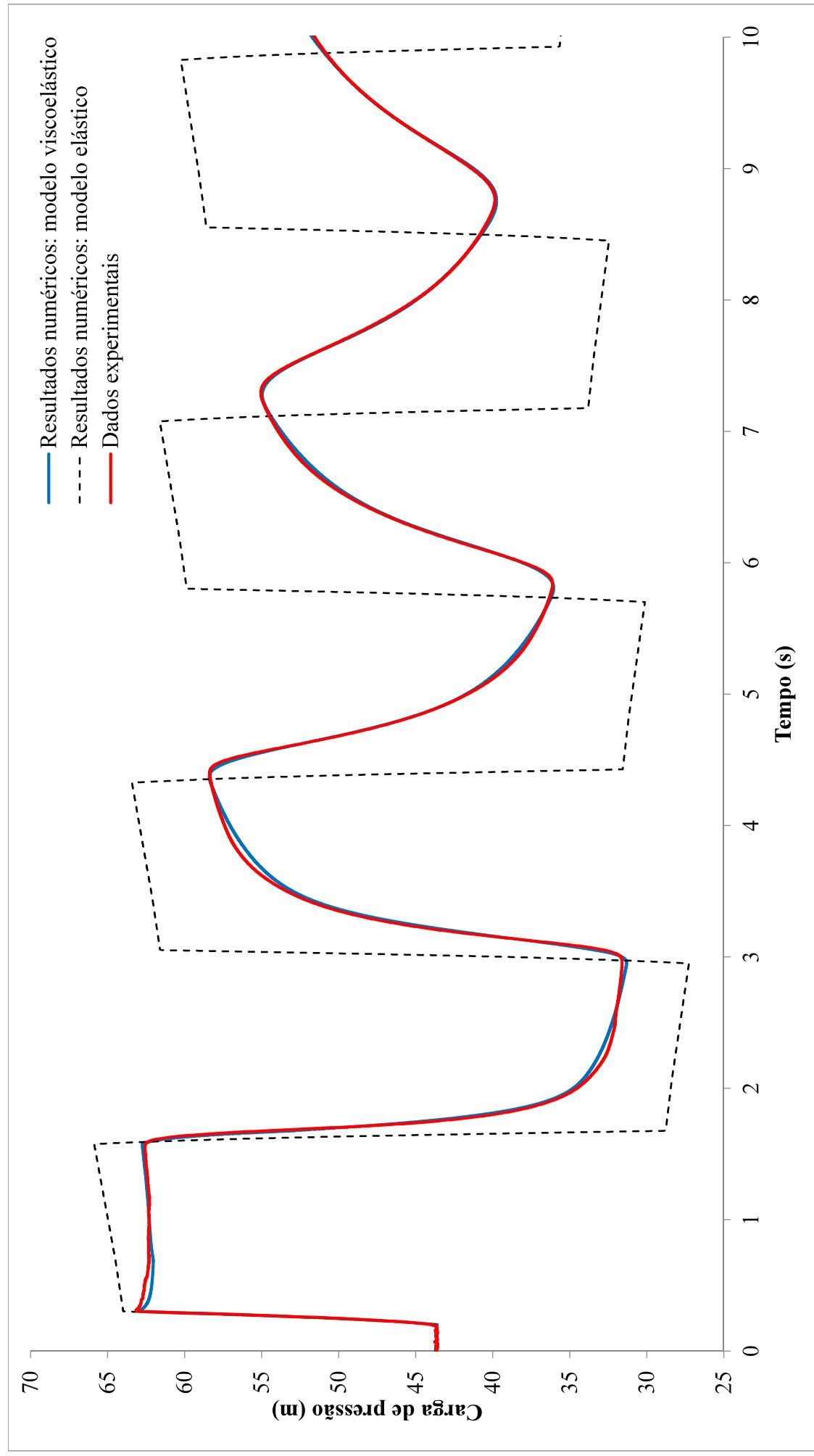
GRÁFICO 4.3 – Resultados numéricos do *Imperial College* e dados experimentais gerados para o ponto do transdutor de Pressão T1.

GRÁFICO 4.4 – Resultados das simulações realizadas para o fator de atrito variável (AV) de Vardy *et al.* (1993) quando  $f_F Re = 250$  inicial e sem AV, negligenciando a viscoelasticidade.

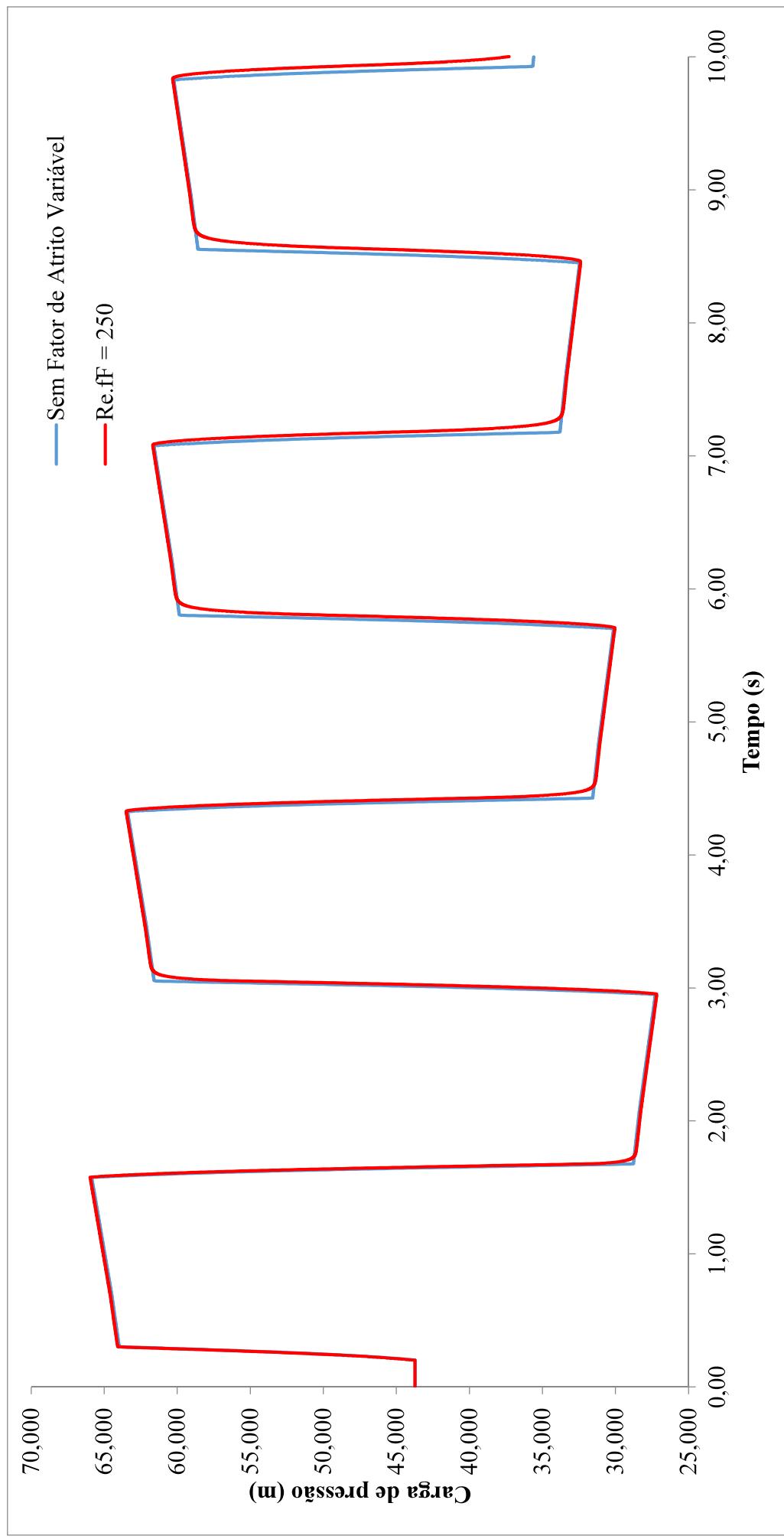


GRÁFICO 4.5 – Resultados das simulações realizadas para o fator de atrito variável de Vardy *et al.* (1993) quando  $f_{FRe} = 2000$  para o ponto médio da tubulação ( $L = 135,8 \text{ m}$ ) e para o ponto extremo à jusante, na válvula ( $L = 271,60 \text{ m}$ ), negligenciando a viscoelasticidade.

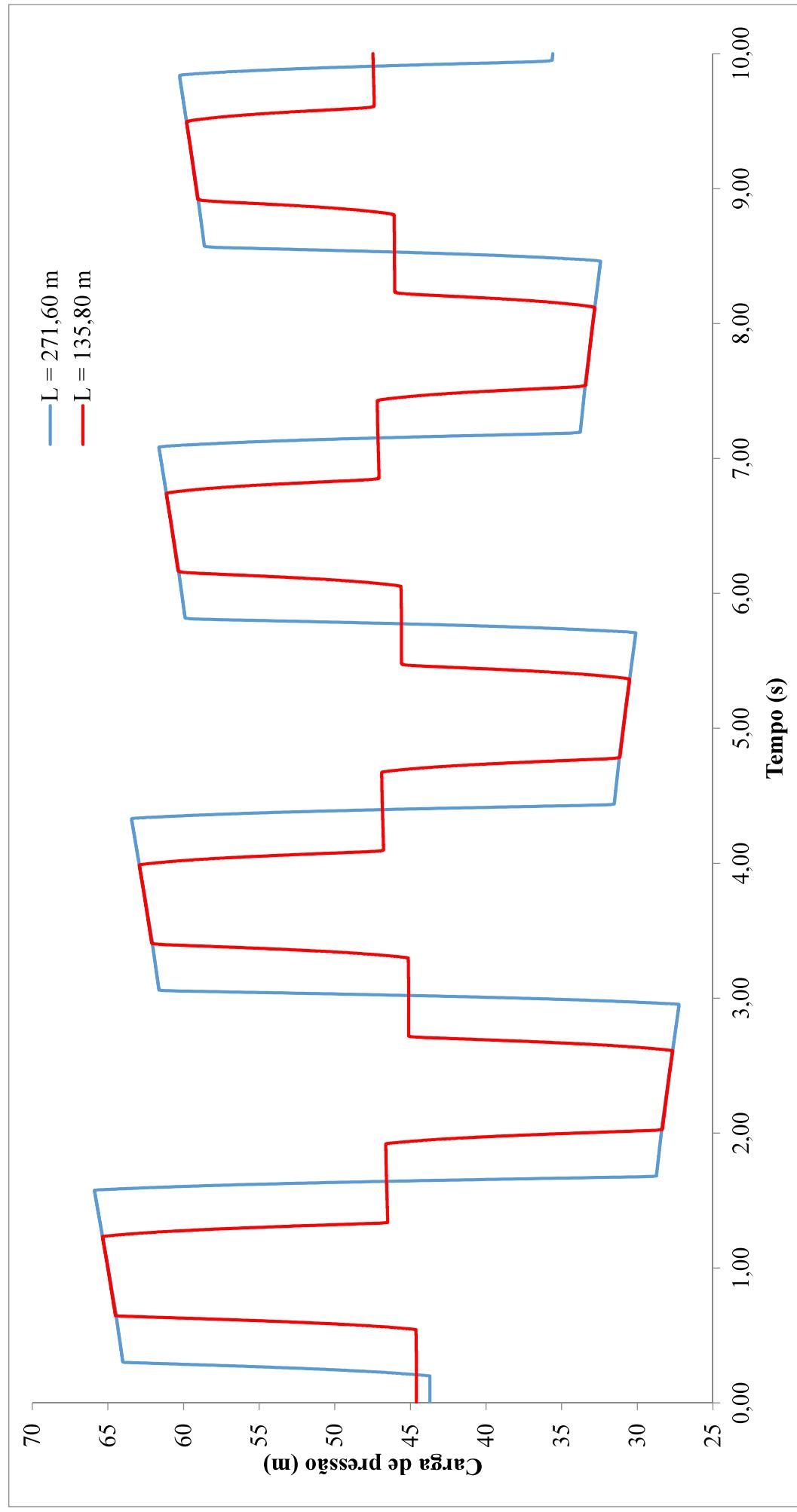


GRÁFICO 4.6 – Resultados das simulações realizadas para o fator de atrito variável de Vítkovský *et al.* (2000) quando  $k = 0,016$  e  $k = 0,0$  (sem AV), negligenciando a viscoelasticidade.

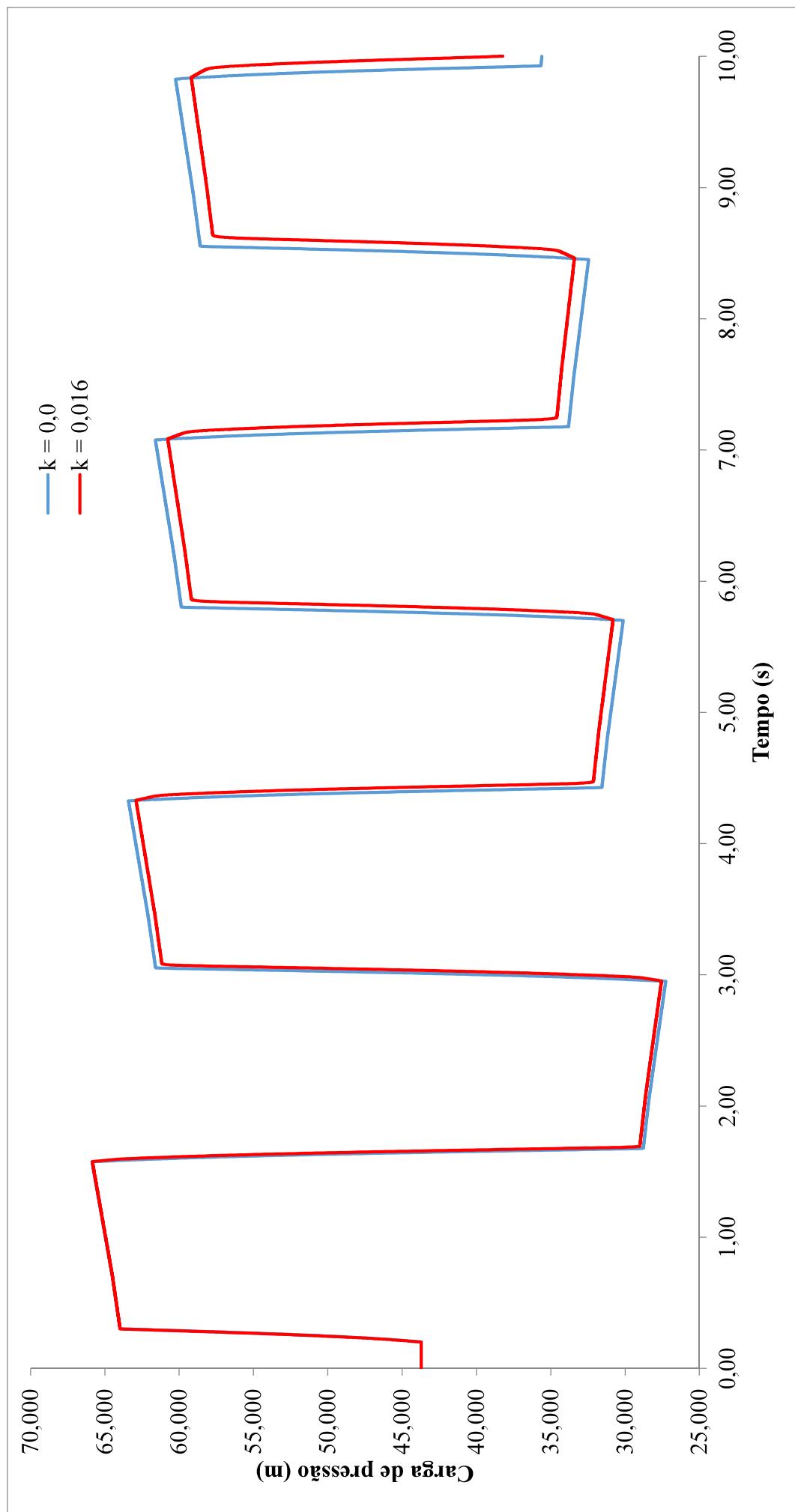


GRÁFICO 4.7 – Resultados das simulações realizadas para o fator de atrito variável de Vítkovský *et al.* (2000) quando  $k = 0,048$  e  $k = 0,0$  (sem AV), negligenciando a viscoelasticidade.

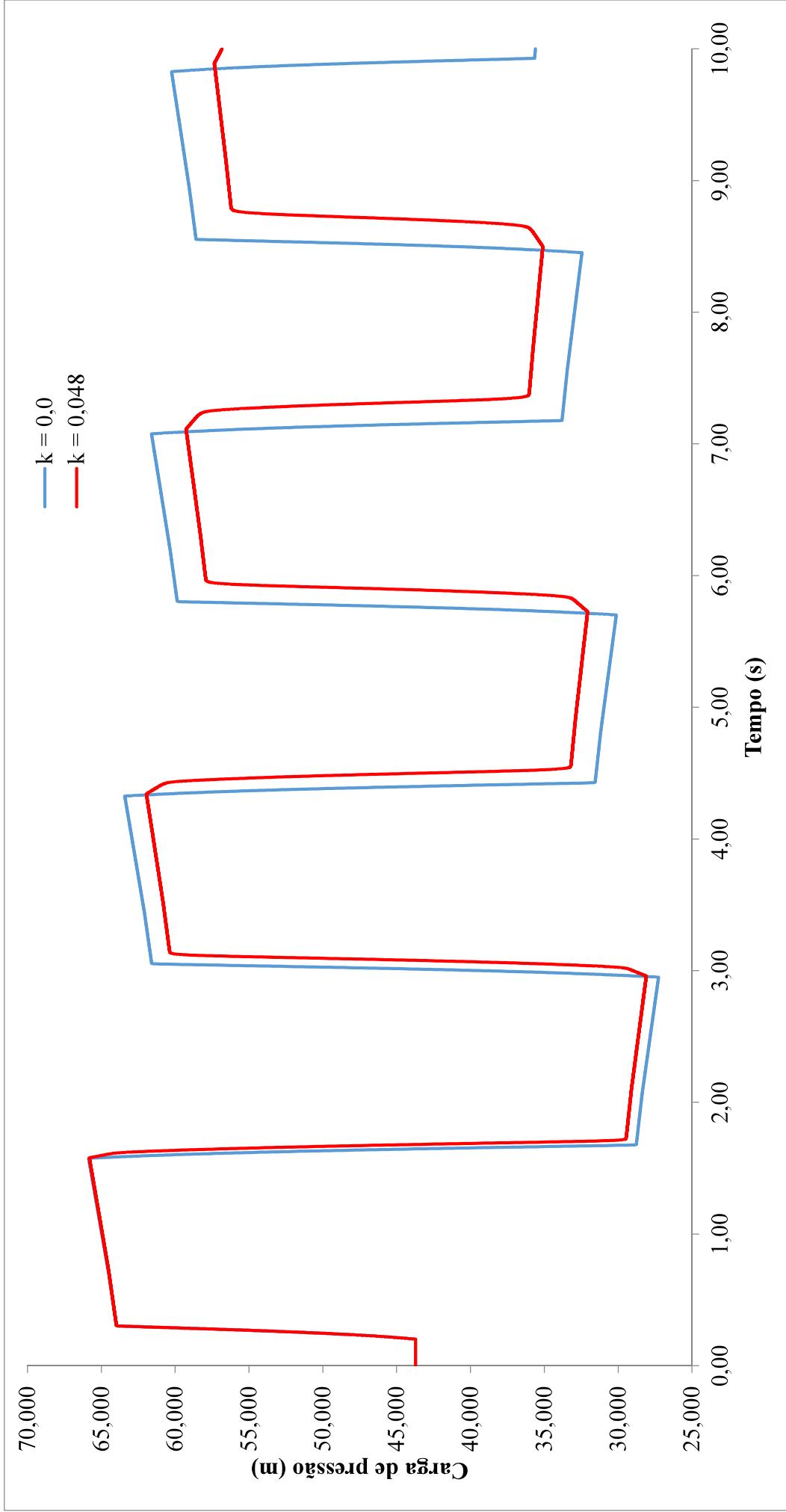


GRÁFICO 4.8 – Resultados das simulações realizadas para o fator de atrito variável de Vitkovský *et al.* (2000) quando  $k$  vale 0,05, 0,10, 0,20, 0,30 e 0,40, negligenciando a viscoelasticidade.

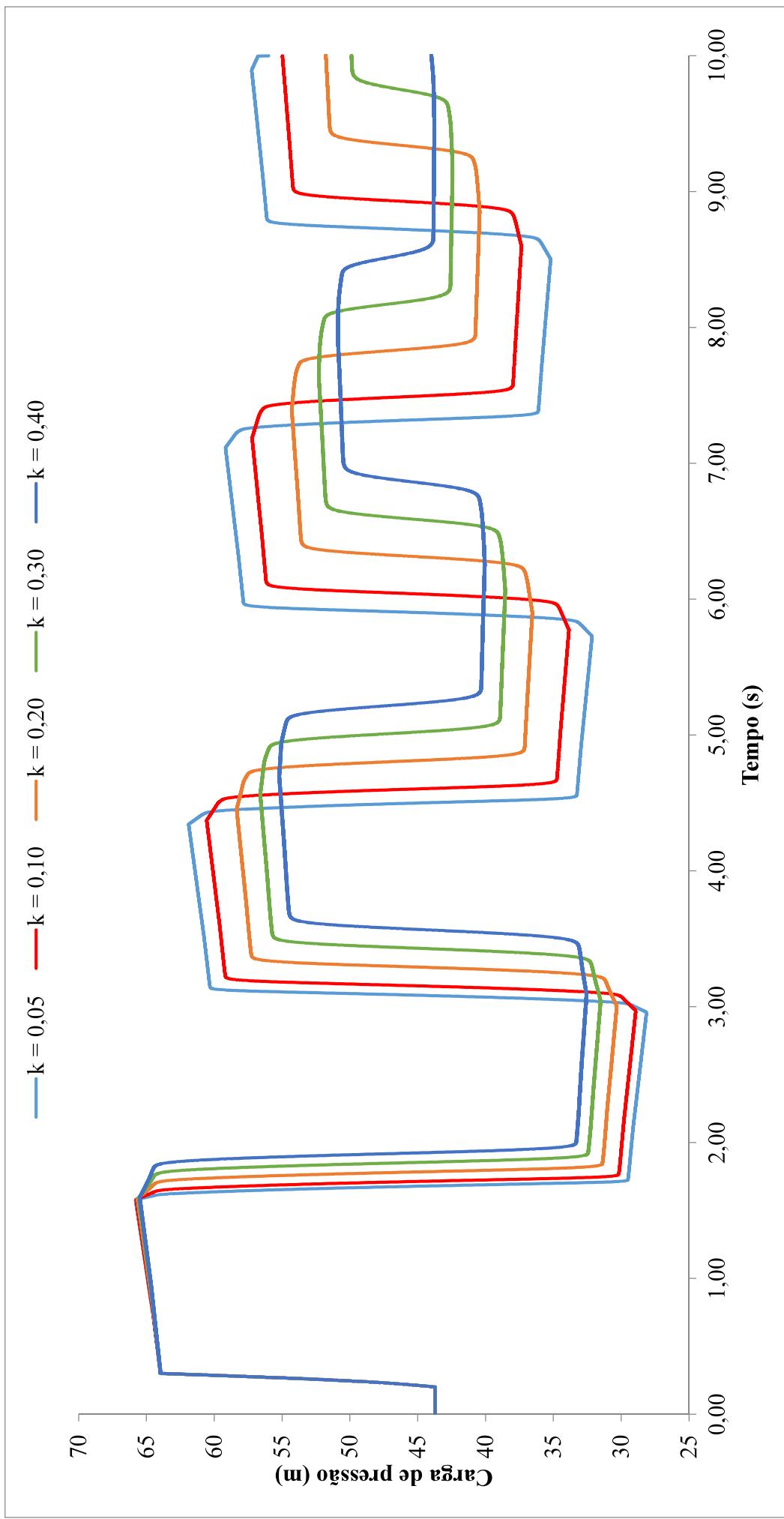


GRÁFICO 4.9 – Resultados das simulações realizadas para o fator de atrito variável de Ramos *et al.* (2004) quando  $k_t = 10\%k_x$  e vale  $k_x = 0,016$  e quando  $k_x = 0,0$  (sem AV), negligenciando a viscoelasticidade.

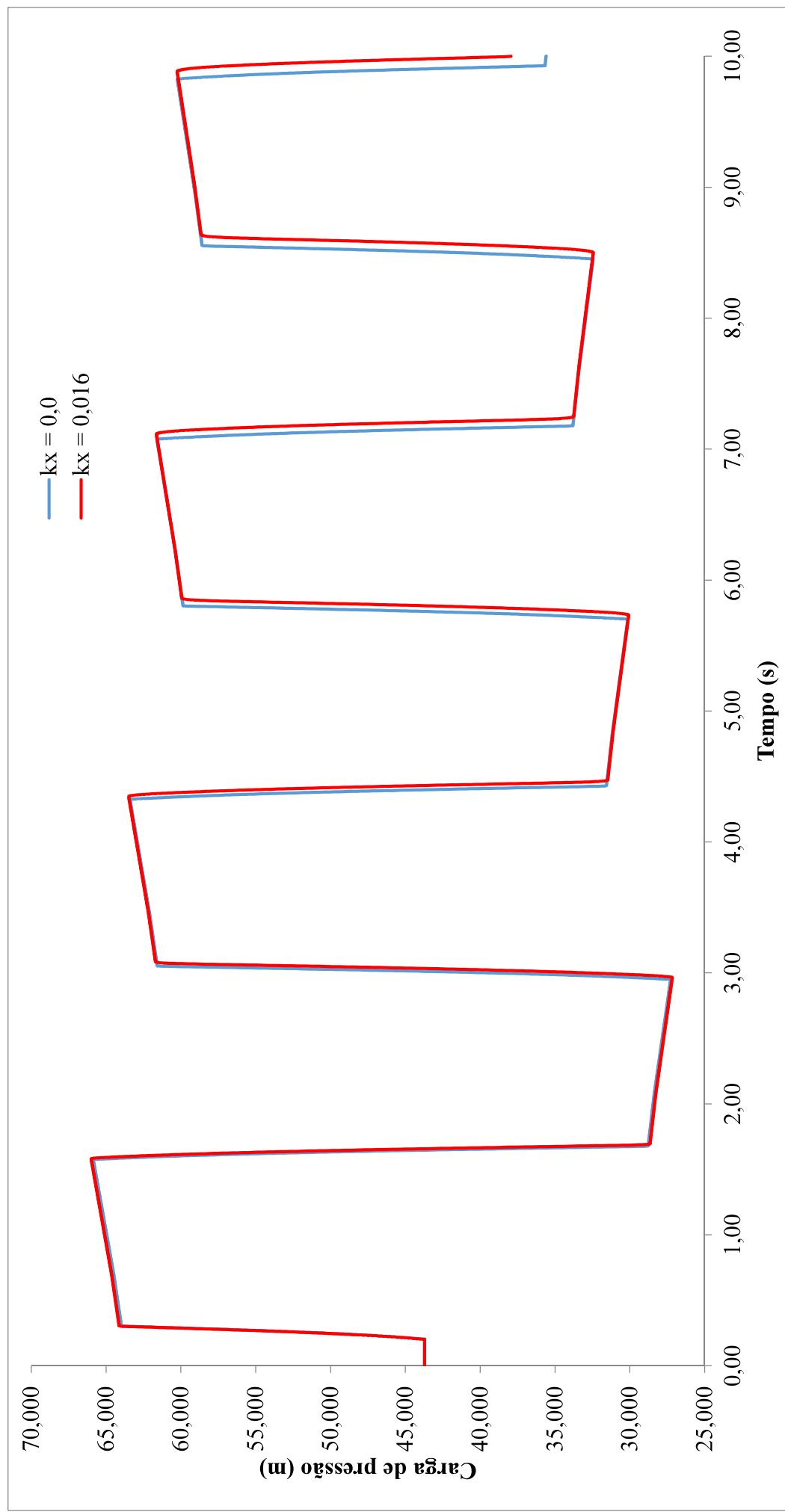


GRÁFICO 4.10 – Resultado das simulações realizadas para o fator de atrito variável de Ramos *et al.* (2004) quando  $k_t = 10\%k_x$  e valor  $k_x = 0,048$  e quando  $k_x = 0,0$  (sem AV), negligenciando a viscoelasticidade.

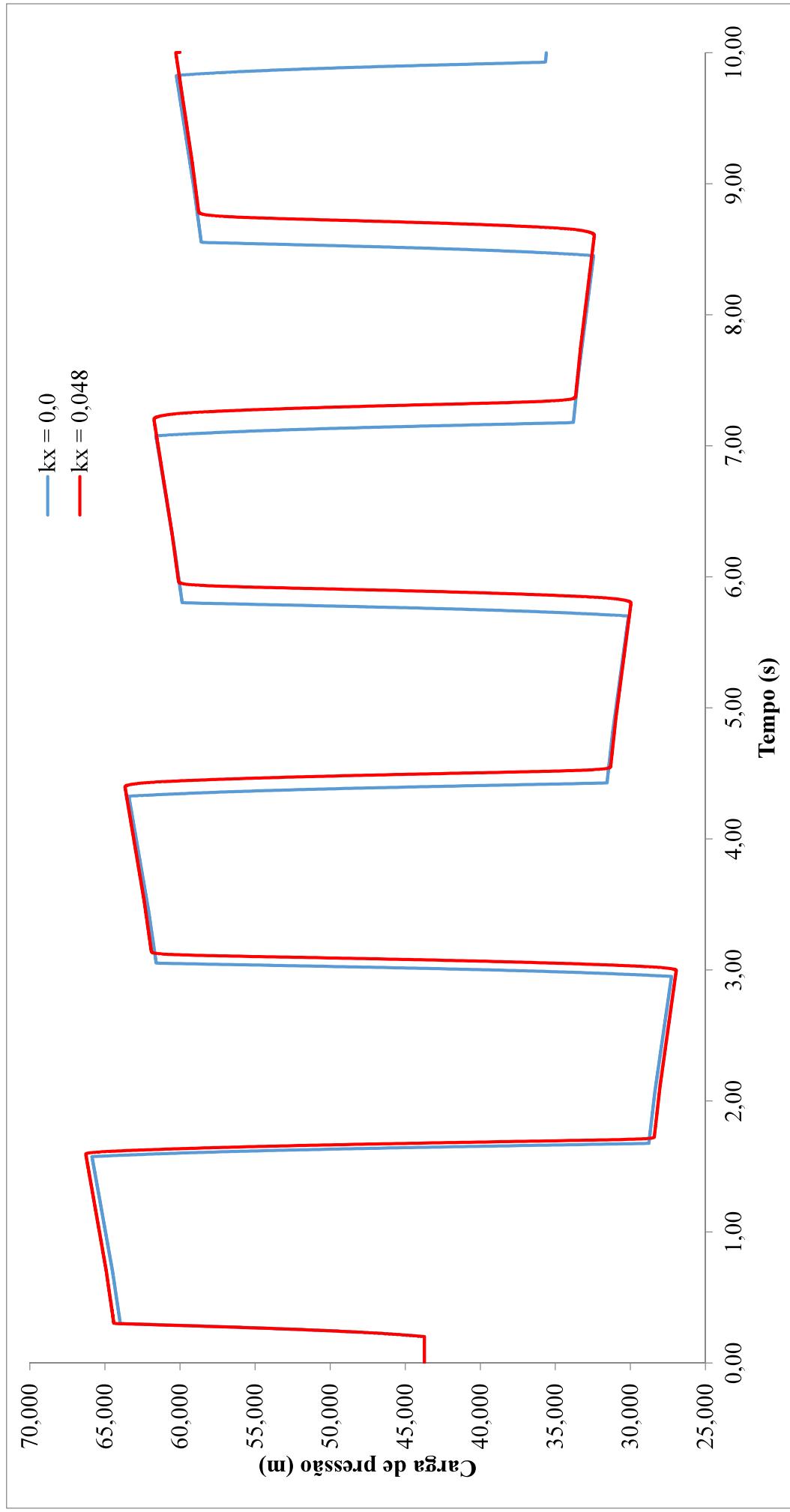


GRÁFICO 4.11 – Resultado das simulações realizadas para o fator de atrito variável de Ramos *et al.* (2004) quando vale  $k_x = 0,2$  e  $k_t = 0,0$  e quando  $k_x$  e  $k_t$  valem zero (sem AV), negligenciando a viscoelasticidade.

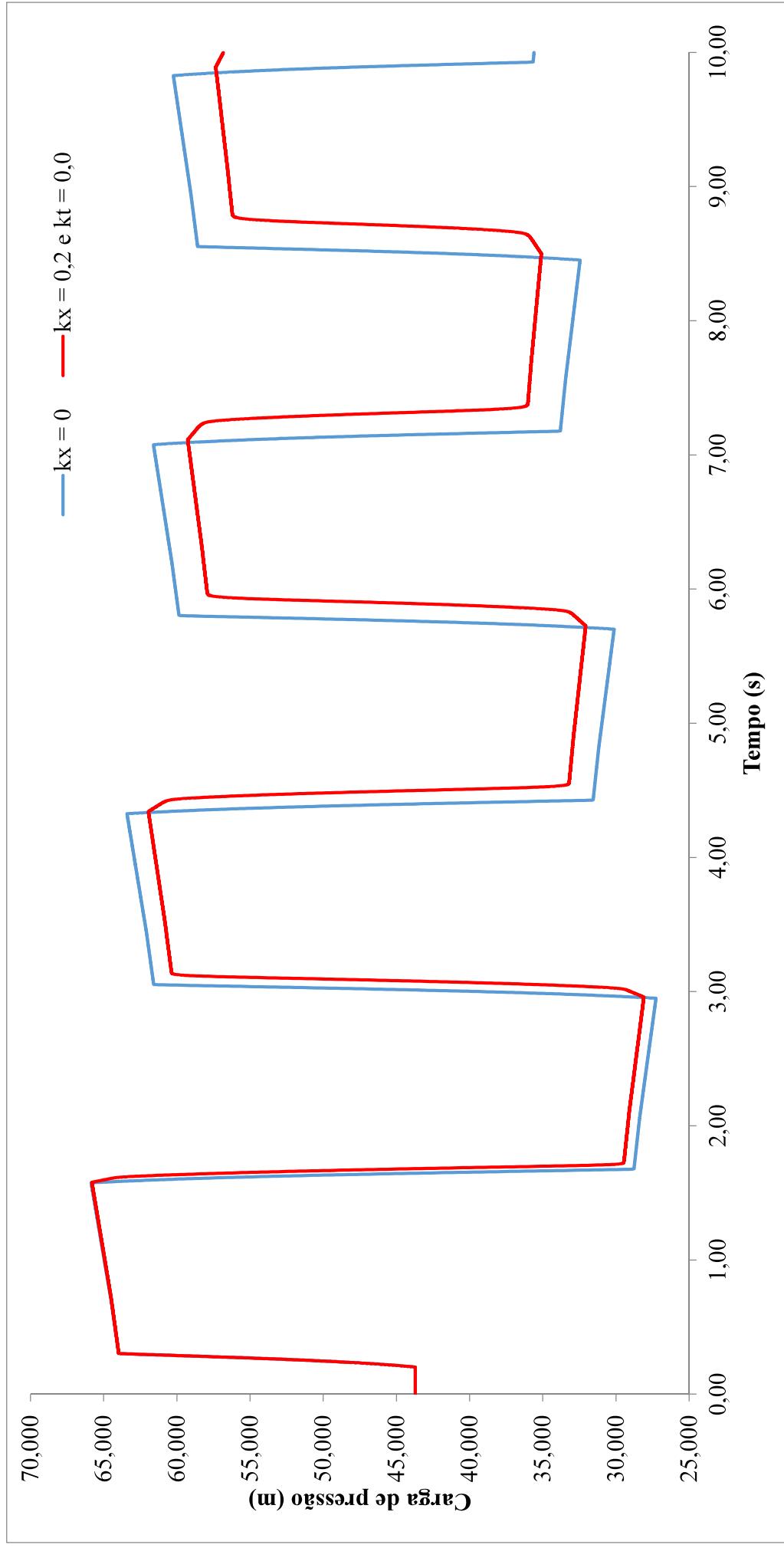


GRÁFICO 4.12 – Resultado das simulações realizadas para o fator de atrito variável de Ramos *et al.* (2004) para  $k_x = 0,016$  quando  $k_t = 10\%k_x$  e para  $k_t = 0,016$  quando  $k_x = 10\%k_t$ , negligenciando a viscoelasticidade.

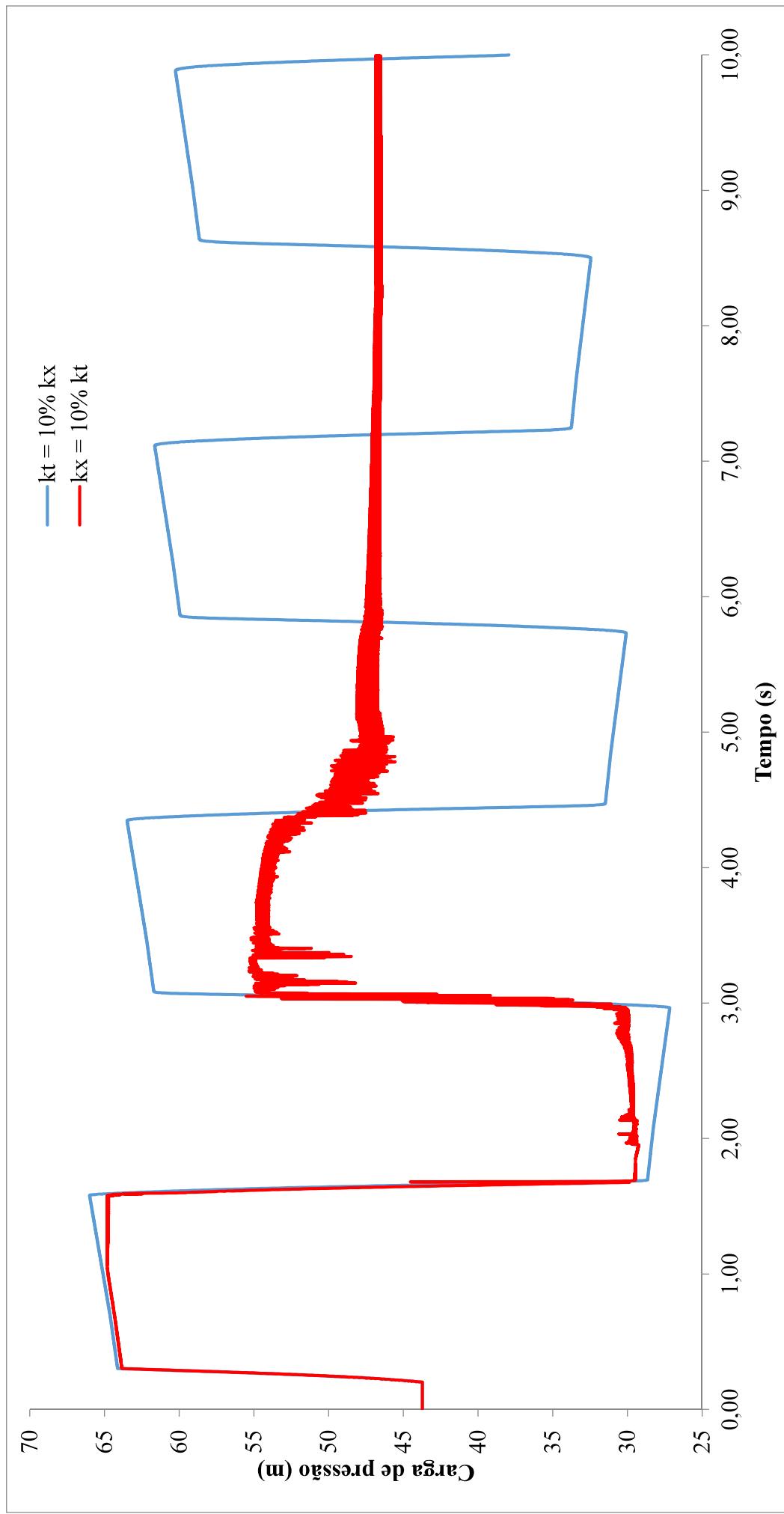


GRÁFICO 4.13 – Resultado das simulações realizadas para o fator de atrito variável de Ramos *et al.* (2004) para  $k_x = 0,016$  quando  $k_t = 10\%k_x$  e para  $k_t = 0,048$  quando  $k_x = 10\%k_t$ , negligenciando a viscoelasticidade.

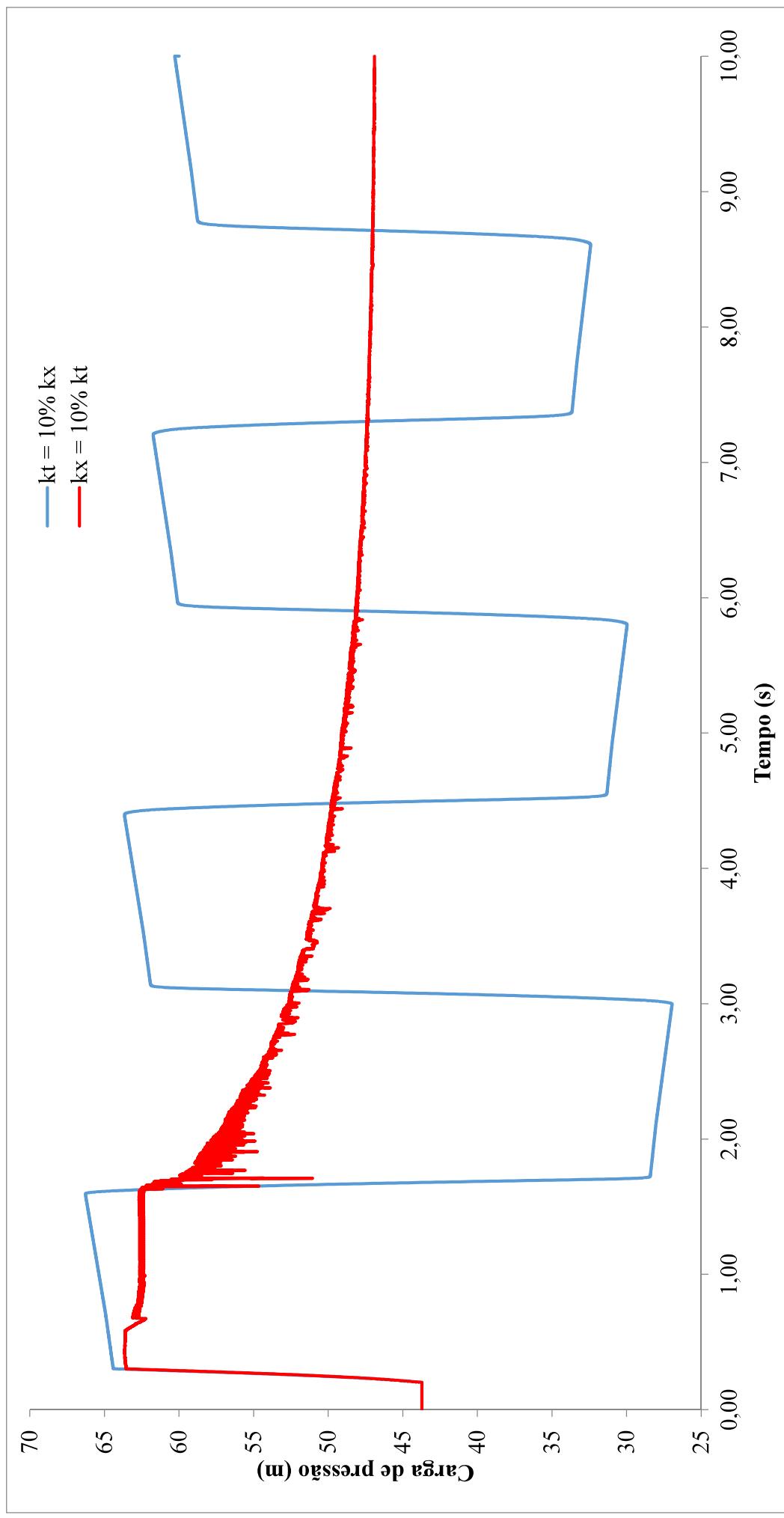


GRÁFICO 4.14 – Resultados das simulações realizadas para o atrito variável de Ramos *et al.* (2004) para  $k_t = 10\%k_x$  quando  $k_t$  vale 0,016, 0,048 e 0,0 (sem AV), negligenciando a viscoelasticidade.

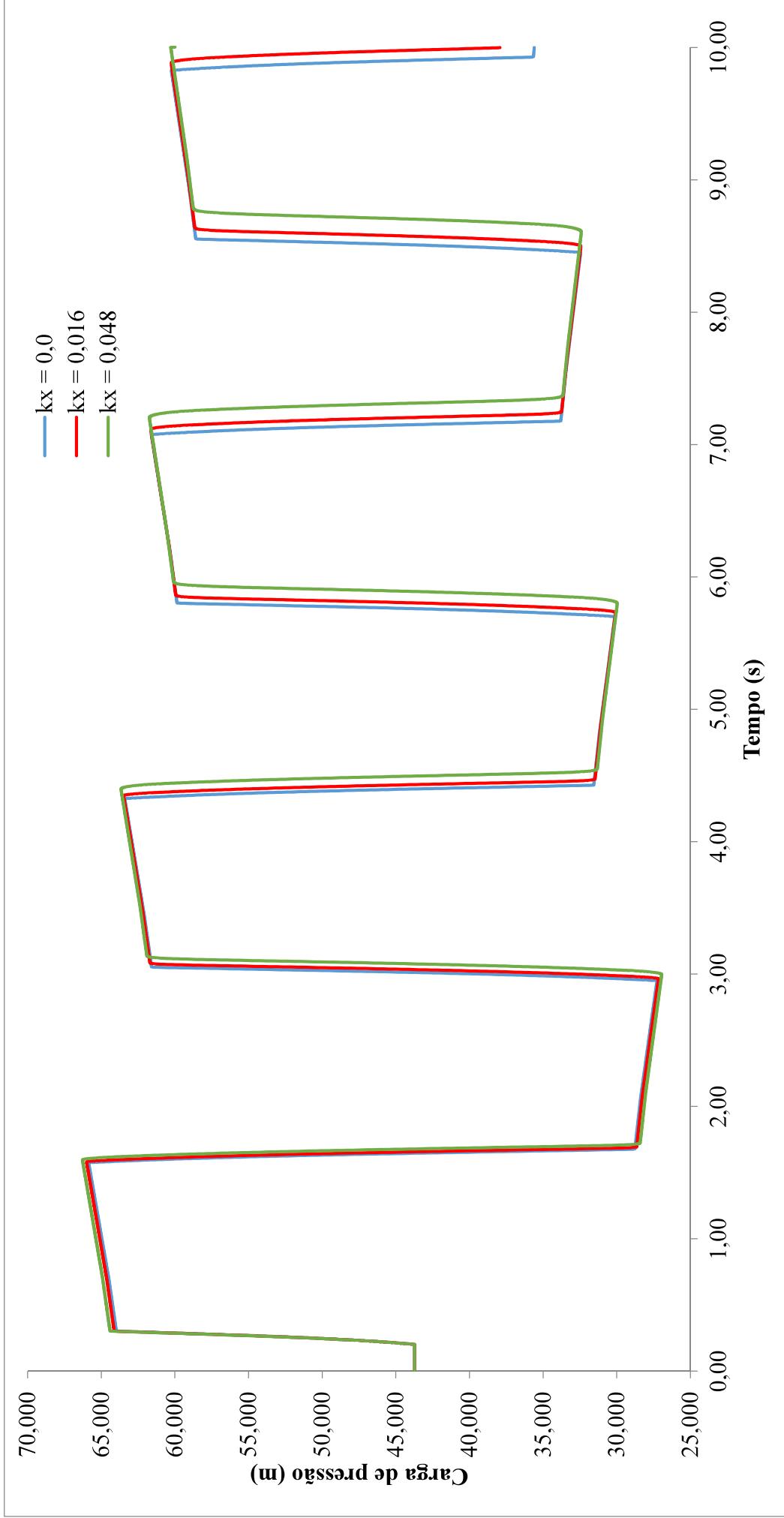


GRÁFICO 4.15 – Resultados das simulações realizadas para o atrito variável de Vardy *et al.* (1993) com  $Re \cdot f_F = 250$ , Vitkoviský *et al.* (2000) com  $k = 0,048$  e Ramos *et al.* (2004) para  $k_t = 10\%k_x$  e para  $k_t = 0,048$ , negligenciando a viscoelasticidade.

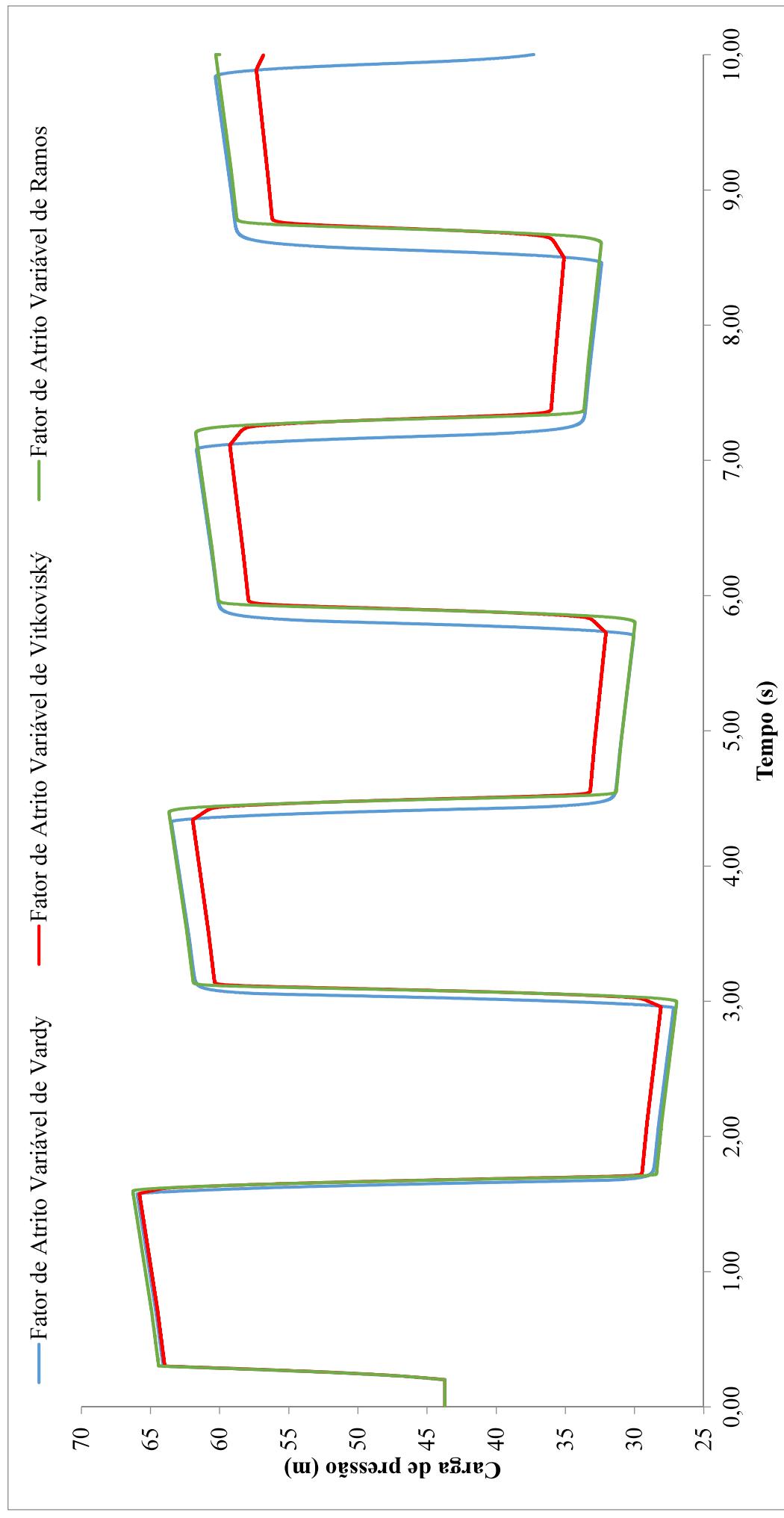


GRÁFICO 4.16 – Resultados das simulações realizadas para fator de atrito permanente sem viscoelasticidade e para viscoelasticidade sem perda por atrito.

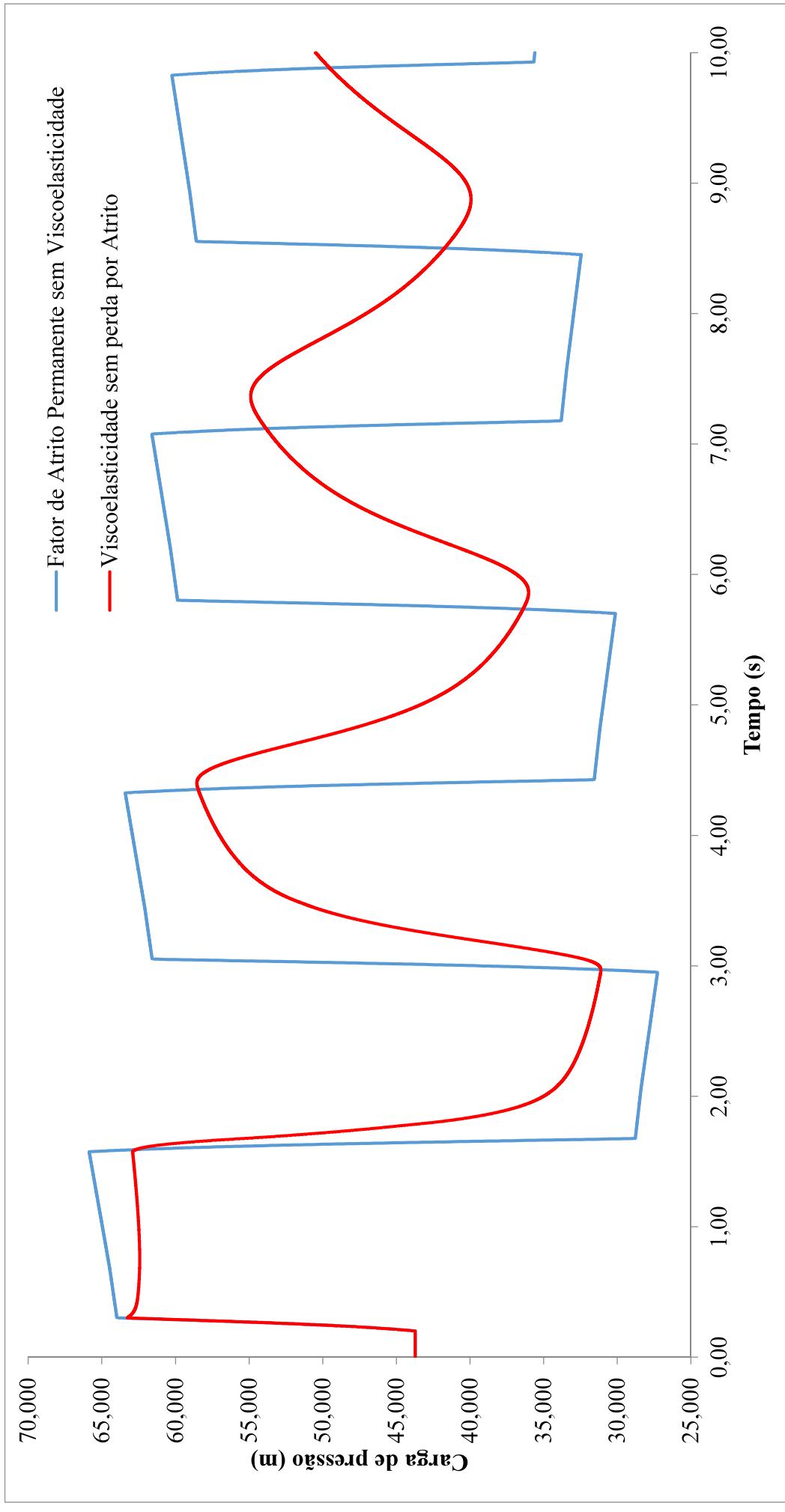


GRÁFICO 4.17 – Resultados das simulações realizadas para viscoelasticidade sem perda por atrito e viscoelasticidade com perda por atrito permanente.

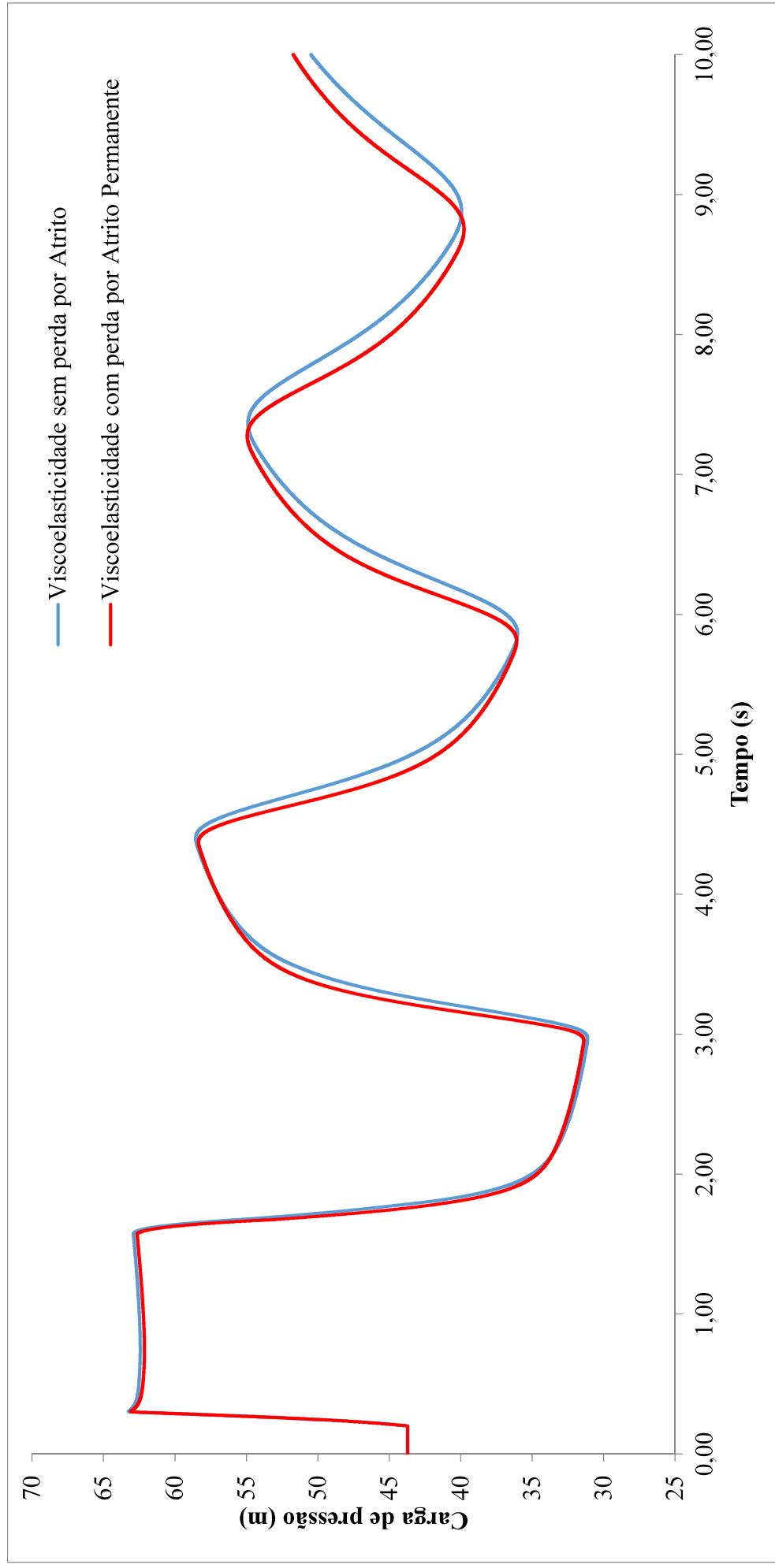


GRÁFICO 4.18 – Resultados das simulações realizadas para viscoelasticidade sem perda por atrito na extremidade da tubulação ( $L=271,60\text{ m}$ ) e na metade da mesma ( $L = 135,80\text{ m}$ ).

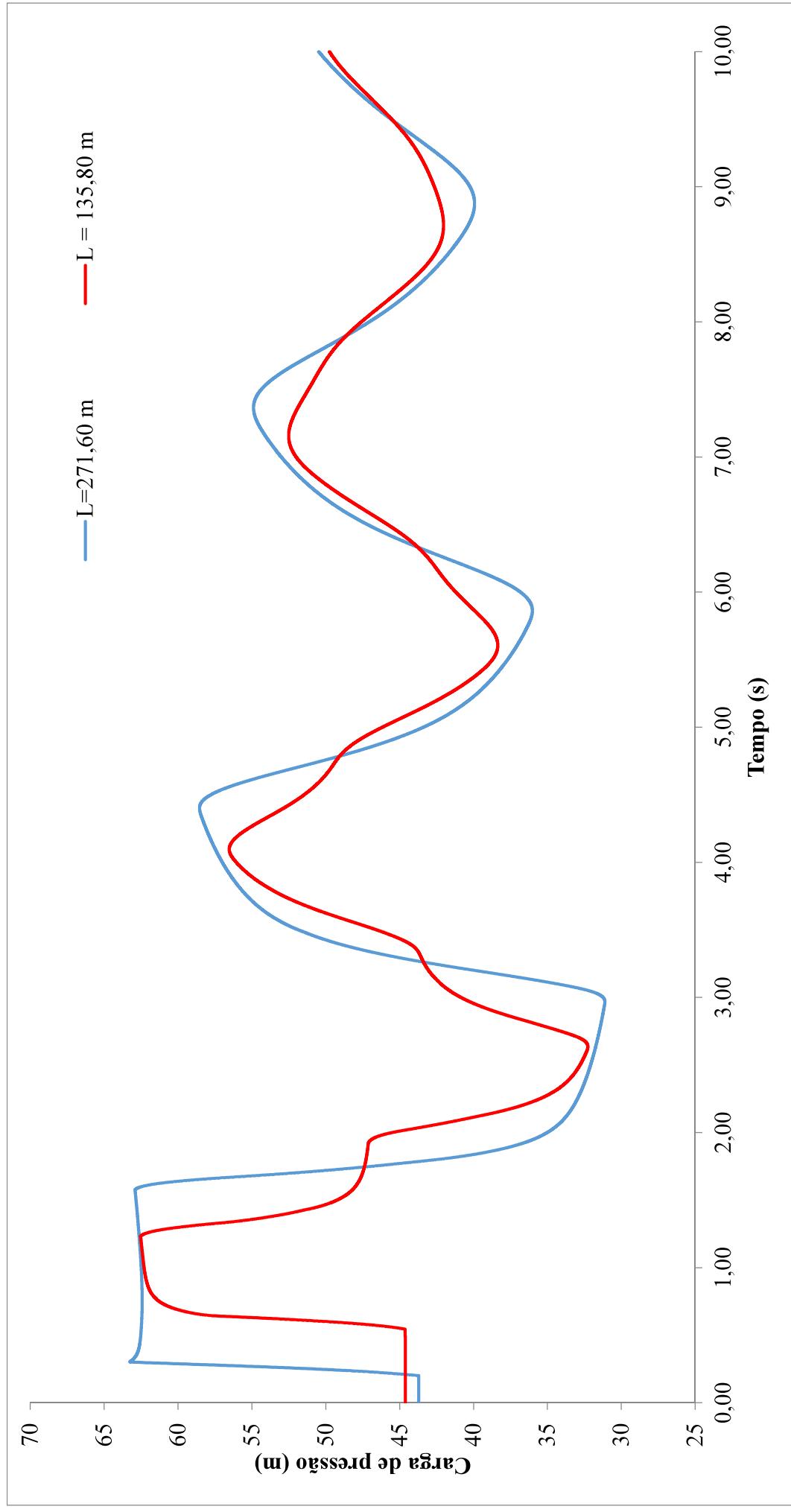


GRÁFICO 4.19 – Resultados das simulações realizadas para viscoelasticidade com perda por atrito permanente e para viscoelasticidade com perda por atrito variável de Vardy *et al.* (1993).

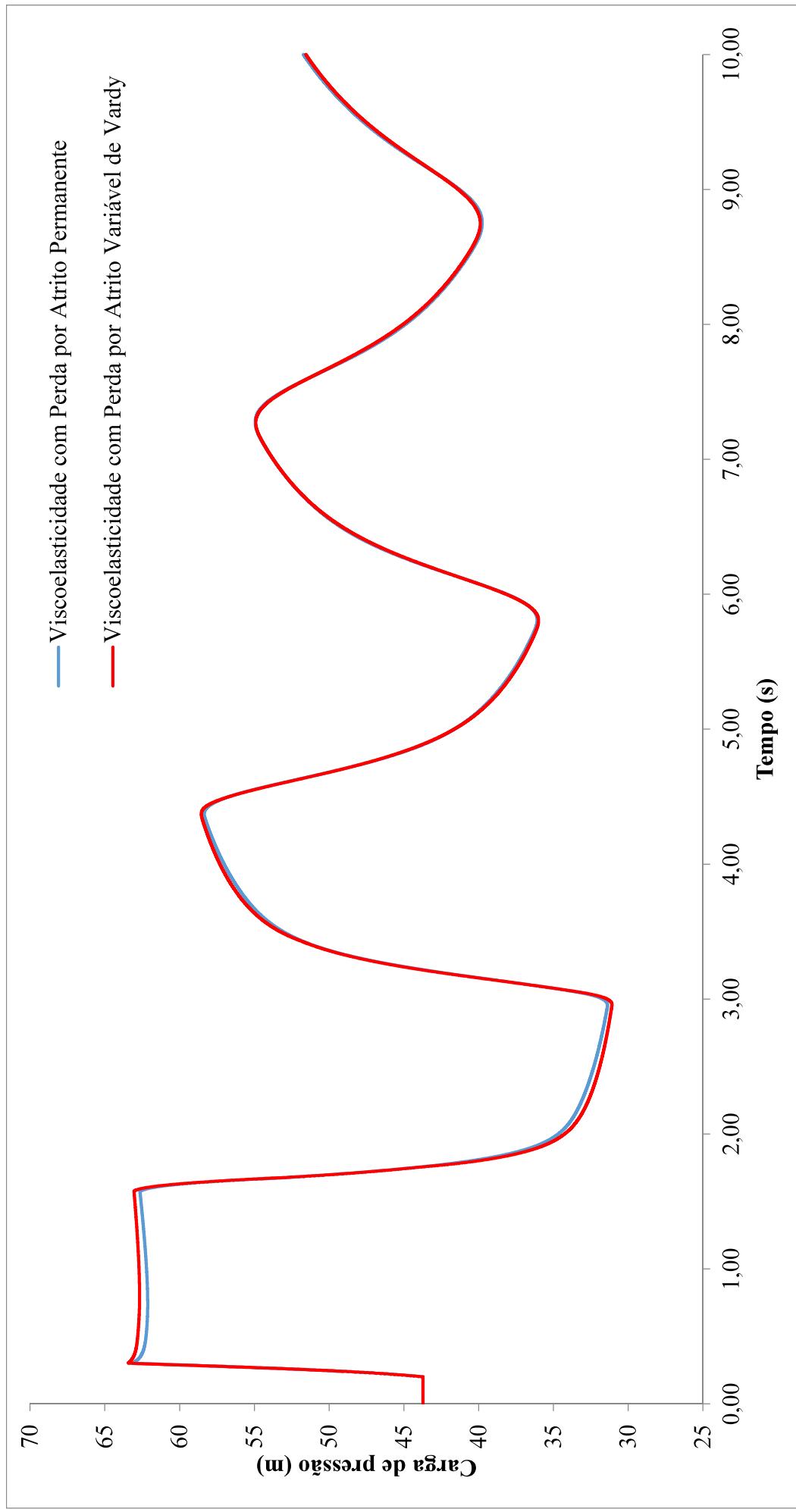


GRÁFICO 4.20 – Resultados das simulações realizadas para viscoelasticidade com perda por atrito permanente e para viscoelasticidade com perda por atrito variável de Vitkoviský *et al.* (2000).

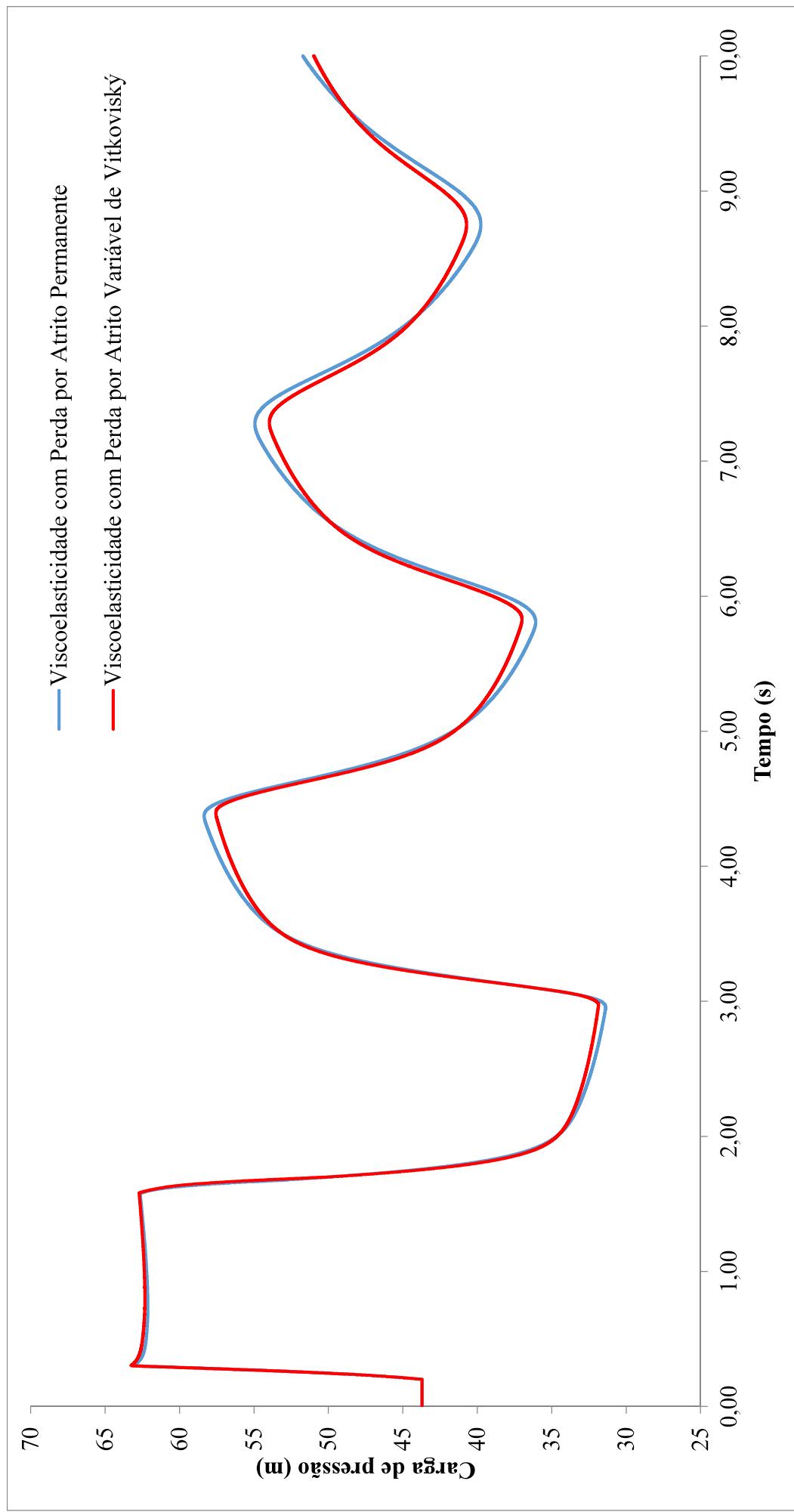


GRÁFICO 4.21 – Resultados das simulações realizadas para viscoelasticidade com perda por atrito permanente e para viscoelasticidade com perda por atrito variável de Ramos *et al.* (2004).

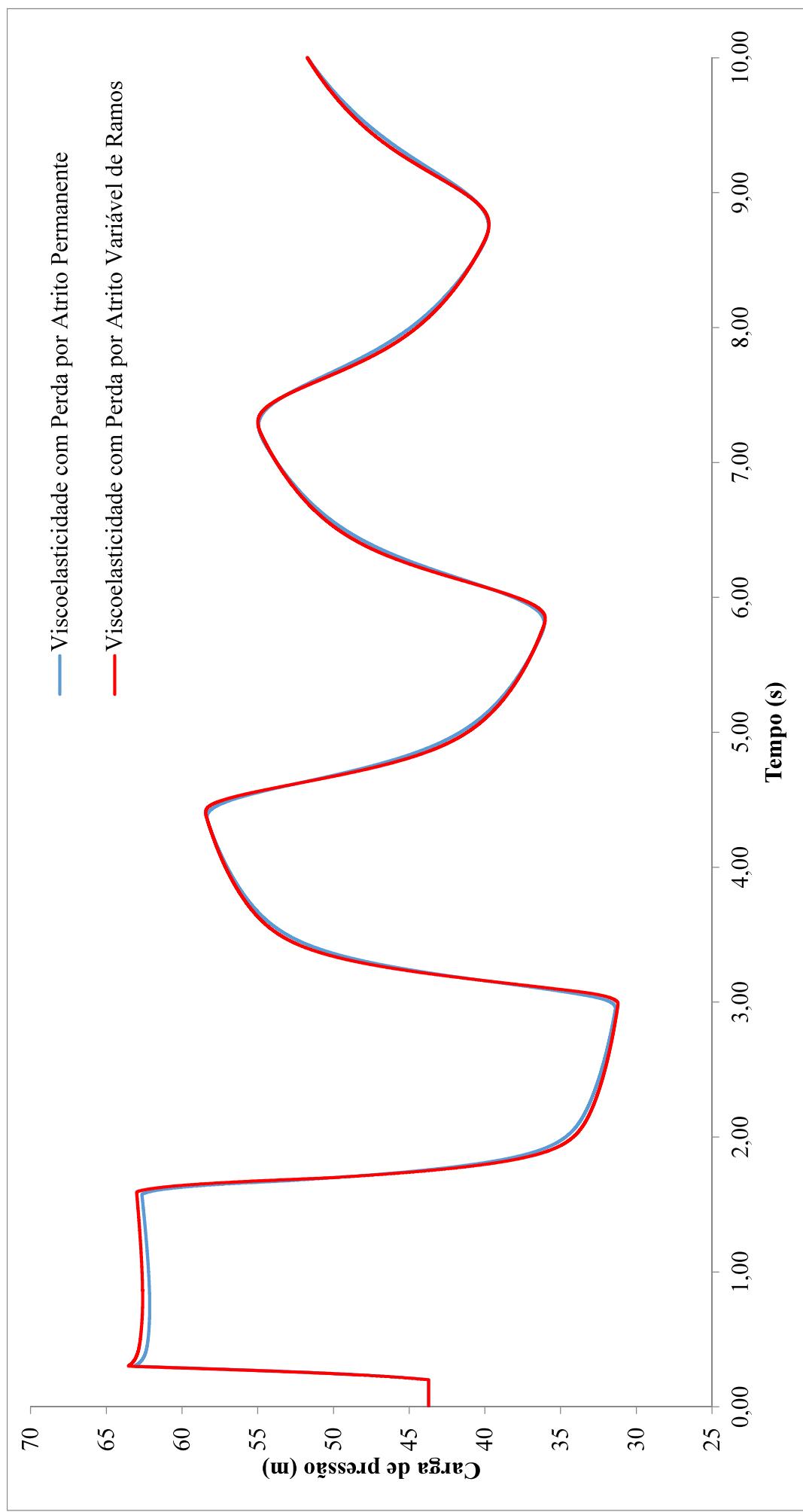
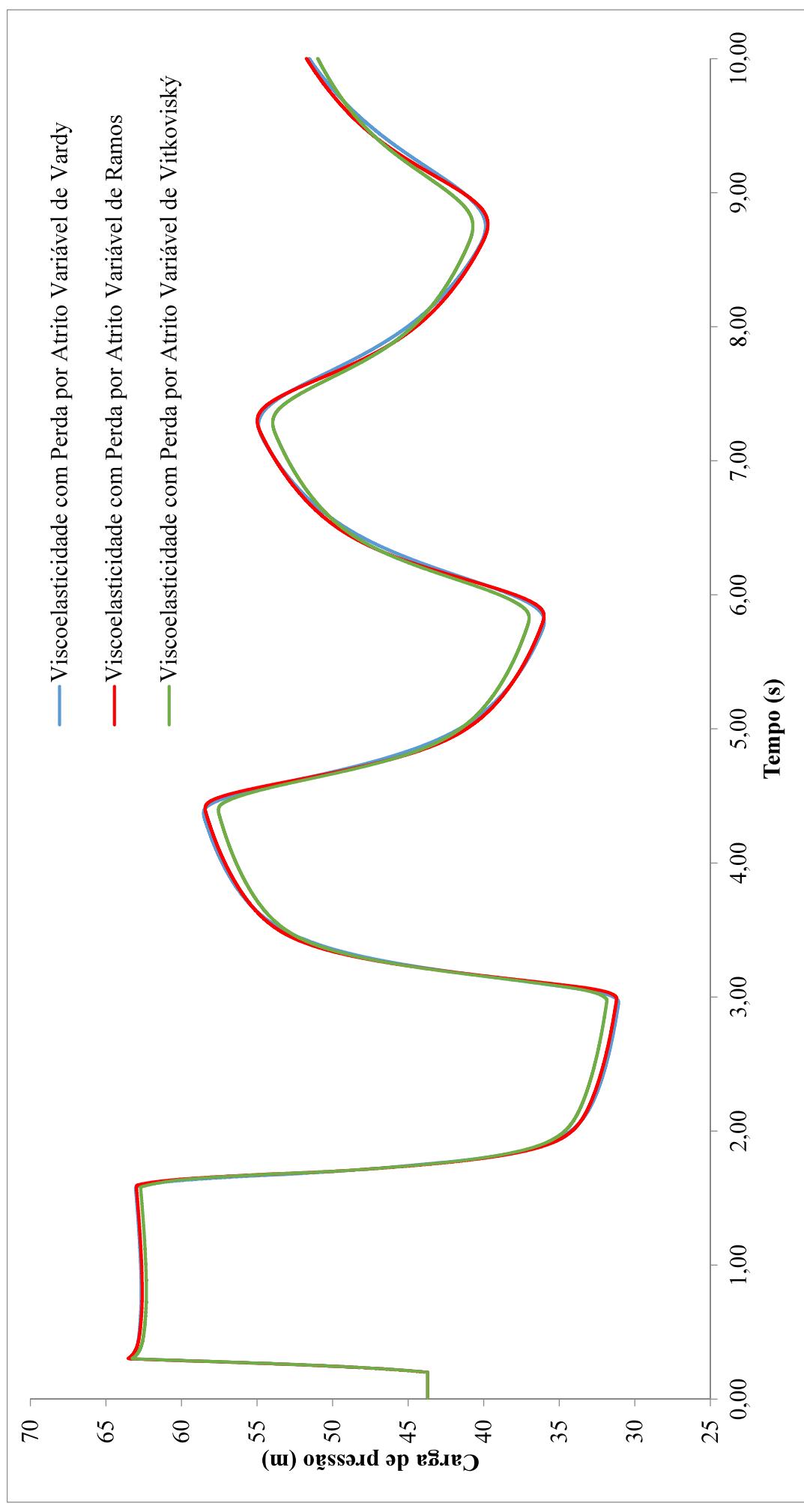


GRÁFICO 4.22 – Resultados das simulações realizadas para viscoelasticidade com perda por atrito variável de Vardy *et al.* (1993), Vitkoviský *et al.* (2000) e Ramos *et al.* (2004).



## 4.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Ao se comparar os dados obtidos nas simulações e os dados obtidos experimentalmente, apresentados nos Gráficos 4.1, 4.2 e 4.3, percebe-se que o modelo proposto por Covas (2003) se aplica muito bem ao representar o evento transitório em condutos forçados plásticos.

Quando se compara a variação da carga de pressão considerando-se somente do fator de atrito permanente com o modelo que considera, também, a parcela transiente do mesmo, como consta no Gráfico 4.4, percebe-se que, para as condições propostas do problema, o fator de atrito variável é responsável por uma leve suavização das curvas de pressão. Analisando-se o resultado da variação da altura piezométrica na válvula e no meio da tubulação, como no Gráfico 4.5, percebe-se que o comportamento da altura piezométrica é em formato piramidal, onde a altura piezométrica fica constante por um breve momento; isto pode ser considerado devido ao fato de a soma das vazões (uma positiva e uma negativa) que percorrem a tubulação no transitório hidráulico quase se anularem, mantendo a cota piezométrica aproximadamente igual ao  $H_R$  do reservatório.

Analizando os Gráficos 4.6, 4.7 e 4.8, é possível perceber a influência direta do fator  $k$  na perda de energia por atrito para o modelo de Vitkoviský *et al.* (2000): quanto maior o valor de  $k$ , maiores são as perdas de energia por atrito e, consecutivamente, mais rápida a atenuação dos picos de pressão. Tal fato pode ser observado no comportamento das curvas para  $k$  igual a 0,40 e 0,05, uma vez que o amortecimento ocorre de forma mais acentuada no maior valor de  $k$  apresentado.

Pelo que se observa nos Gráficos 4.9 e 4.10, o fator de atrito variável gerou um retardo nos picos de pressão e, ainda que pequena, uma atenuação dos picos de pressão devido às condições do problema. Esse retardo se deve pelo fato de o termo  $k_t$  (termo local) ser responsável pela maior parte do amortecimento dos picos de pressão no transiente hidráulico enquanto que o  $k_x$  (termo convectivo) é responsável pelo retardo da curva. Para os Gráficos 4.9 e 4.10 houve retardo da onda de pressão na primeira e quase nenhum retardo na segunda, e para o Gráfico 4.11, zerando-se o termo  $k_t$  e aumentando o valor de  $k_x$  o retardo da onda de pressão continuou evidente e a atenuação da mesma foi observado.

Ao analisar-se os Gráficos 4.12 e 4.13, percebe-se que para as condições em que  $k_x = 10\% k_t$  o resultado obtido é insatisfatório, pois o comportamento apresentado contraria o esperado pelo que foi observado nos resultados das demais formulações, ocorrendo pontos de

instabilidade. Pelo Gráfico 4.14 percebe-se que quanto maior o valor de  $k_x$ , mais a onda de pressão é retardada.

Analizando-se o Gráfico 4.15, é perceptível que os modelos de Vitkoviský *et al.* (2000) e Ramos *et al.* (2004) apresentam o mesmo retardo da onda de pressão para o problema proposto, sendo que o primeiro modelo atenua os picos de pressão.

Analizando-se o efeito da viscoelasticidade durante o evento transitório nos Gráficos 4.16 e 4.17, percebe-se que o mesmo é responsável por considerável parcela da atenuação dos picos de pressão gerados e que a perda por atrito permanente ocasiona um retardo na onda.

Pelo Gráfico 4.18, observa-se que os picos de pressão são acentuados de forma mais rápida no ponto interno à tubulação comparado ao ponto extremo imediatamente antes da válvula e o padrão interno segue o mesmo observado no modelo de fator de atrito sem viscoelasticidade: os picos de pressão são gerados em formatos que se assemelham a degraus.

Pelo que se observa nos Gráficos 4.19, 4.20 e 4.21, o efeito do fator de atrito variável é consideravelmente menor que o efeito da viscoelasticidade, visto que as curvas com e sem fator de atrito variável são praticamente iguais. Salvo o modelo de Vitkoviský *et al.* (2000) onde é perceptível uma atenuação maior nos picos de pressão se comparado com o modelo viscoelástico sem fator de atrito variável, o que também é visto no Gráfico 4.22.



## CAPÍTULO 5

### CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com os modelos propostos pela literatura para os fatores de atrito variável de Vardy *et al.* (1993), Vitkovský *et al.* (2000) e Ramos *et al.* (2004) e permanente de Swamee (1993), ao analisar os resultados obtidos para as formulações, conclui-se que o fator de atrito variável não pode ser negligenciado quando considerado o efeito transiente em condutos forçados, pois este fator é responsável por parcela do amortecimento dos picos de pressão do sistema, negligenciando a viscoelasticidade do material do conduto. Verificou-se, também, que no modelo de Ramos *et al.* (2004), para valores de  $k_t$  quando  $k_x = 10\%k_t$ , a formulação proposta não representa o comportamento esperado para a curva dos picos de pressão, não sendo recomendado para esse grupo de valores.

Percebe-se, ao se analisar os gráficos que consideram a influência da viscoelasticidade do material no transitório, que a contribuição viscoelástica do material é responsável por considerável parcela de perda de carga no escoamento e, consequente amortecimento dos picos de pressão se comparada à contribuição do fator de atrito variável, somente. Assim, é notória a necessidade de sua inserção no modelo quando se trata de tubulações compostas por materiais plásticos viscoelásticos.

Como apresentado no presente trabalho, percebe-se que há muitos autores estudando e tentando modelar o efeito transitório de forma a descrever de forma mais fiel o efeito transitório. Assim, fica clara a necessidade de tratar com relevância os efeitos transitórios em escoamentos em condutos forçados visando a minimização dos danos materiais e humanos que a negligência do efeito em obras da engenharia pode acarretar, uma vez que as altas pressões resultantes podem gerar a falha do sistema devido aos transitórios hidráulicos, potencializando os riscos às pessoas que operam os sistemas.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CHAUDHRY, M.H. (2014). **Applied Hydraulic Transients**, Springer, ISBN 978-1-4614-8537-7.
- COVAS, D. I. C. (2003). **Inverse Transient Analysis for Leak Detection and Calibration of Water Pipe Systems Modeling Special Dynamic Effects**. Tese (PhD) – Department of Civil and Environmental Engineering, Imperial College of Science, Technology and Medicine, London, UK, 2003. 68 p.
- COVAS, D.; RAMOS H.; ALMEIDA, A. B. (2005). **Impulse Response Method for Solving Hydraulic Transients in Viscoelastic Pipes**. In: XXXI IAHR Congress, Seoull, Korea, 12-18 Sept. 2005.
- CRUZ, E. **Acidente em Usina Hidrelétrica na Rússia**. Traduzido e Adaptado por: Gilson Cardoso, 2009.
- FRANKE, G.; SEYLER, F. (1983). **Computation of Unsteady Pipe Flow with Respect to Viscoelastic Material Properties**. Journal of Hydraulic Research, IAHR, v. 21, n. 5, 345-353 p.
- GALLY, M.; GUNEV, M.; RIEUTORD, E. (1979). **An Investigation of Pressure Transients in Viscoelastic Pipes**. Journal of Fluids Engineering, Trans. ASME, v. 101, p. 495-499.
- HOLMBOE, E. L.; ROULEAU, W. T. (1967). **The Effect of Viscous Shear on Transient in Liquid Lines**. ASME. 174-180 p.
- JUNG, B.S.; BOULOS, P.F.; WOOD, D.J. (2007). **Impacts of Skeletonization on Distribution System Hydraulic Transient Models**. World Environmental and Water Resources Congress, 2007.
- KARNEY, B. W. (2006). **Assessing the Degree of Unsteadiness in Flow Modeling: From Physics to Numerical Solution**. Cincinnati – Ohio: 8th Annual Water Distribution Systems Analysis Symposium. 15 p.
- LARSON, M.; JONSSON, L. (1991). **Elastic Properties of Pipe Materials during Hydraulic Transients**. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, v. 117, n. 10, p. 1317-1331.

MEIßNER, E.; FRANKE, G. (1997). **Influence of Pipe Material on the Dampening of Waterhammer.** Em: Proceedings of the 17º Congress of the International Association for Hydraulic Research, Pub. IAHR, Baden-Baden, F.R. Germany.

RACHID, F. B. F.; MATTOS, H. C.; STUCKENBRUCK, S. (1992). **Waterhammer in Inelastic Pipes: an approach via Internal Variable Constitutive Theory.** Proceedings of the International Conference on Unsteady Flow and Fluid Transients, Pub. Bettess & Watts (eds), Balkema, Rotterdam, The Netherlands, 63-70.

RAMOS, H.; COVAS, D.; BORGA, A. LOUREIRO, D. (2004). **Surge Damping Analysis in Pipe Systems:** Modelling and Experiments. Journal of Hydraulic Research, v. 42, n. 4. 413-425 p.

RIEUTORD, E.; BLANCHARD, A. (1979). **Ecoulement Non-permanent en Conduite Viscoelastique – Coup de Bélier.** Journal of Hydraulic Research, IAHR, v. 17, n. 1, p. 217-229.

SOARES, A. K. (2007). **Calibração e Detecção de Vazamentos em Modelos de Sistemas Hidráulicos no Escoamento Transitório.** 2007. 336 p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 72 p.

SWAMEE, P. K. **Design of a Submarine Pipeline.** (1993). Journal of Transportation Engineering, v. 119, n.1. 159-170 p.

VARDY, A. E.; BROWN, J. M. B.; HE, S. (1993). **A Weighting Function Model for Transient Turbulent Pipe Friction.** Journal of Hydraulic Research, v. 31, n. 4. 533-548 p.

VARDY, A. E.; BROWN, J. M. (1996). **On Turbulent, Unsteady, Smooth-Pipe Friction.** Proceedings of the 7º International Conference on Pressure Surges and Fluid Transients in Pipelines and Open Channels, Harrogate, BHR Group, p. 289-311.

VITKOVSKÝ, J. P.; LAMBERT, M. F.; SIMPSON, A. R.; BERGANT, A. (2000). **Advances in Unsteady Friction Modeling in Transient Pipe Flow.** In: ANDERSON A. (ed): VIII International Conference on Pressure Surges: Safe Design and Operation of Industrial Pipe Systems, The Hague, Holanda. BHR Group 2000 Pressure Surges, Publicação n. 39, v. 1. 471-482 p.

WICHOWSKI, R. (2006). **Hydraulic Transients Analysis in Pipe Networks by the Method of Characteristics (MOC).** Archives of Hydro-Engineering and Environmental Mechanics, Vol. 53, No. 3, pp. 267–291.

WYLIE, E.B.; STREETER, V.L. (1978). **Fluid Transient**, McGraw-Hill.

WYLIE, E.B.; STREETER, V.L. (1993). **Fluid Transients in Systems**, Prentice Hall.