

6 Resultados

Neste capítulo serão apresentados os resultados experimentais obtidos sobre o comportamento dinâmico da válvula de alívio testada. Os testes foram conduzidos utilizando a seção de testes construída e seguindo os procedimentos experimentais descritos nos capítulos anteriores. Serão apresentados também neste capítulo resultados para o comportamento dinâmico da válvula de alívio, obtidos a partir de simulador comercial largamente utilizado na indústria para a previsão do comportamento transiente de escoamento em dutos. Em particular, serão testadas, através de comparação com os resultados experimentais produzidos no presente trabalho, as rotinas computacionais que buscam prever o comportamento dinâmico das válvulas de alívio e que são acopladas aos simuladores computacionais.

A apresentação dos resultados será iniciada pelos resultados experimentais obtidos para o coeficiente de descarga da válvula de alívio operando em regime permanente como função da abertura. Também, são apresentados resultados sobre o coeficiente de descarga da válvula de bloqueio utilizada para produzir os transientes hidráulicos necessários para a ativação da válvula de alívio. Estas informações são necessárias para alimentar o simulador computacional permitindo a previsão do comportamento dinâmico da válvula e sua posterior comparação com os dados experimentais.

6.1. Coeficiente de Descarga da Válvula de Alívio para Regime Permanente

O coeficiente de descarga da válvula de alívio operando em regime permanente foi determinado a partir de dados obtidos experimentalmente. Foram fixadas diferentes frações de abertura através do travamento da haste da válvula em diferentes alturas, utilizando um sistema de porca e contra-porca instalado no castelo da válvula.

Este sistema é composto de uma barra metálica fixada no corpo da válvula que possui um furo com folga por onde a haste com rosca da válvula de alívio passa. Na haste foram enroscadas duas porcas, sendo uma abaixo da barra metálica e outra acima. Na Figura 5.22, que apresenta o acelerômetro, é possível observar a barra metálica pintada de preto e as porcas em latão na haste da válvula de alívio.

Primeiramente levantou-se o coeficiente de descarga (C_d) da válvula de alívio para diferentes vazões. Para isso, manteve-se a vazão constante através da válvula para algumas frações de aberturas, controlando-se a vazão através da válvula de bloqueio na descarga da bomba. Foram registrados os dados referentes à pressão a montante e a jusante da válvula e à fração de abertura para as vazões de 2,0; 2,5; 3,0; 3,5 e 4,0 m³/h. A Figura 6.1 apresenta os resultados para o coeficiente de descarga da válvula, C_d , calculados a partir da equação (18), considerando a área de 0,110 pol² e massa específica da água de 998 kg/m³.

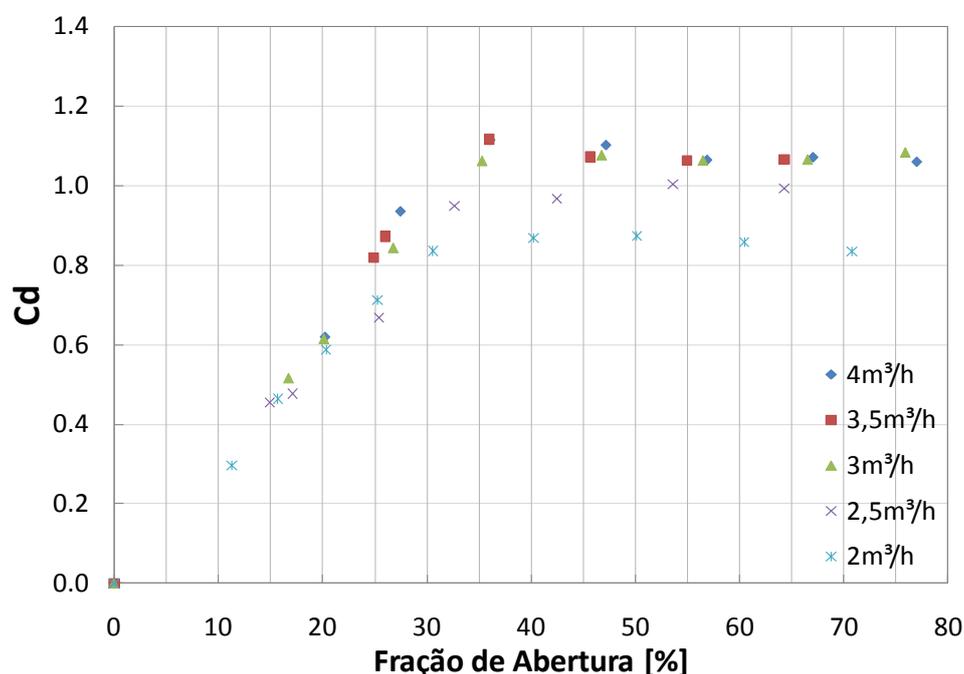


Figura 6.1 – Coeficiente de descarga da válvula de alívio como função da abertura para diferentes vazões, na condição de operação de regime permanente.

Uma observação dos resultados da figura mostra um comportamento linear do coeficiente de descarga até um valor de aproximadamente 35% de abertura. Acima deste valor da abertura nota-se um patamar no valor do coeficiente de descarga, que varia com a vazão.

Nota-se também nos resultados da figura que, para as vazões de 2,5 a 4 m³/h, o coeficiente de descarga mostrou-se independente da vazão para uma abertura de até 35%. Uma fraca dependência do coeficiente de descarga com a vazão é observada para a vazão de 2 m³/h, a mais baixa das vazões testadas. É possível que esta diferença seja atribuída às mudanças nos padrões do escoamento no interior da válvula. É sabido que pontos de separação do escoamento em torno do disco da válvula tornam-se mais estáveis quanto maior for o valor da vazão representada pelo número de Reynolds do escoamento. No caso de baixas vazões a variação da posição dos pontos de separação pode afetar o coeficiente de arraste do disco afetando, em última análise, o coeficiente de descarga da válvula.

Um comportamento do coeficiente de descarga similar àquele apresentado na Figura 6.3 foi obtido através de simulação computacional das equações de Navier-Stokes para uma geometria simplificada de uma válvula de alívio por pesquisadores do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio utilizando o programa Fluent. A Figura 6.2 apresenta as linhas de corrente obtidas para a simulação que considerou o escoamento como sendo axissimétrico [6]. A Figura 6.3 apresenta os resultados computacionais obtidos por estes pesquisadores para o coeficiente de descarga em função da fração de abertura da válvula [6].

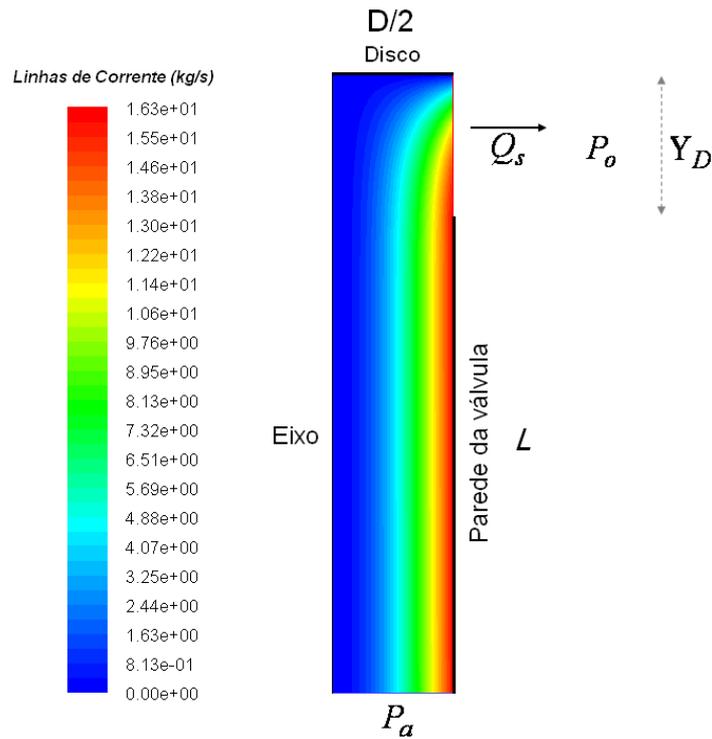


Figura 6.2 – Linhas de corrente representando o escoamento na geometria da válvula de alívio axissimétrica. Resultados numéricos obtidos com o programa Fluent [6].

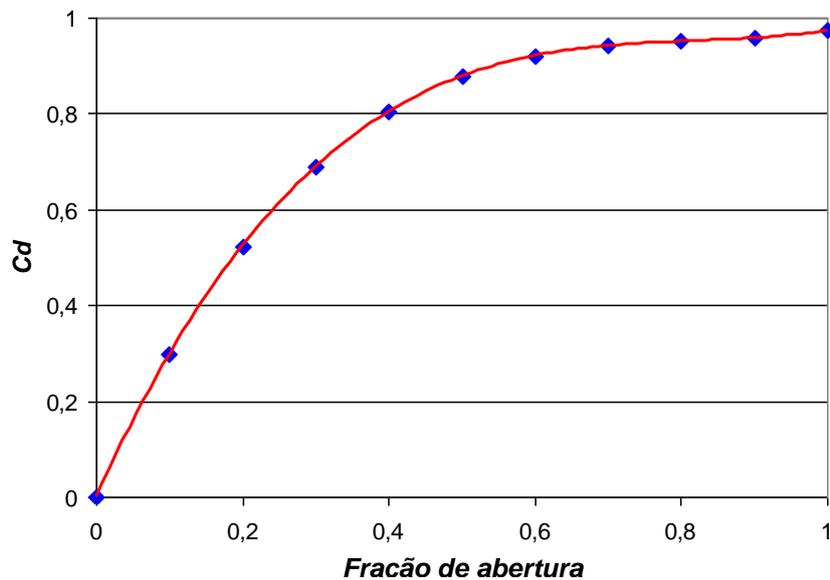


Figura 6.3 – Coeficiente de descarga para a válvula de alívio como função da abertura, por simulação numérica empregando o programa Fluent [6].

Foram realizados experimentos adicionais de medição do coeficiente de descarga da válvula de alívio somente para a vazão constante de 4 m³/h utilizando uma variação mais fina da fração de abertura de 5 % até 70 %. Com os valores médios de pressões e vazão medidos calculou-se o C_d pela Equação (18). A Figura 6.4 apresenta a curva do C_d calculado em função da fração de abertura da válvula de alívio. Os valores máximos e mínimos foram calculados através das pressões e vazões máximas e mínimas que proporcionaram os C_d máximos e mínimos para determinada fração de abertura.

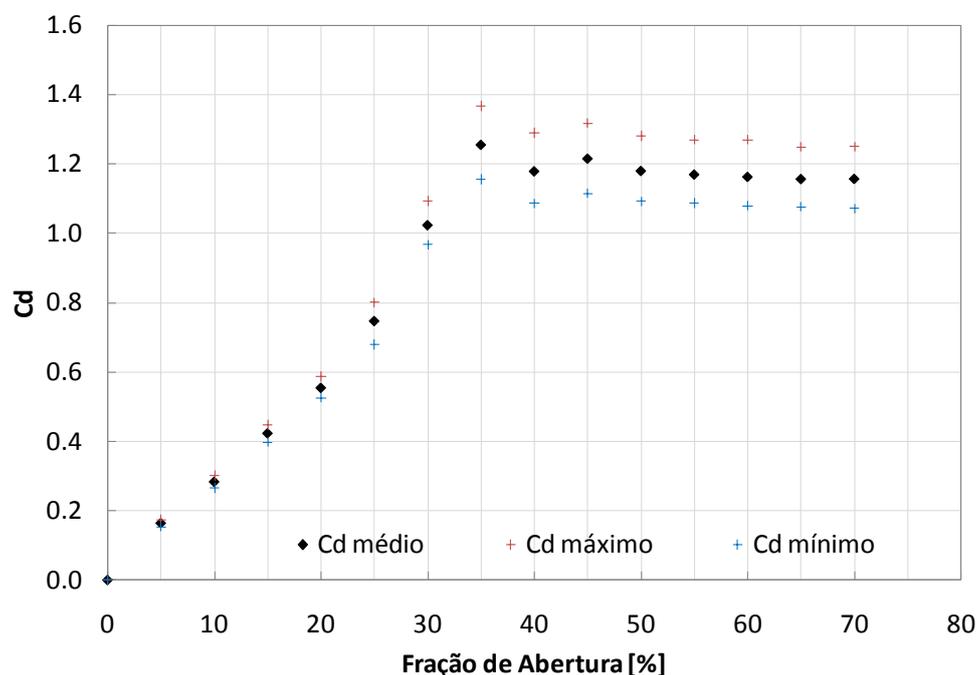


Figura 6.4 – Valore médio, máximo e mínimo para os coeficientes de descarga da válvula de alívio médios para a vazão de 4 m³/h.

O programa computacional comercial utilizado na simulação dos transientes hidráulicos requer como informação de entrada o coeficiente de descarga da válvula de alívio como função da abertura da válvula. Para este programa, no entanto, esta informação deve ser fornecida na forma de um coeficiente dimensional dado em unidades inglesas $\text{gpm/psi}^{0.5}$.

Para realizar esta conversão foi utilizada a expressão (24):

$$CV = FC_d A \sqrt{\frac{2}{\rho}} \quad (24)$$

onde,

CV – coeficiente de vazão

F – fator de conversão de unidades

A – área

ρ – massa específica

Quando todas as unidades estão no sistema internacional (SI), o fator de conversão de unidades é igual a 1. Como o programa de simulação computacional utilizado solicita o coeficiente de vazão em unidades inglesas [gpm/psi^{0.5}] e para água, foi utilizada a equação (25).

$$CV \left[\frac{gpm}{\sqrt{psi}} \right] = 38C_d A [pol^2] \quad (25)$$

Os resultados apresentados na Figura 6.4 foram convertidos para estas unidades e estão apresentados na Figura 6.5 na forma do, chamado, coeficiente de vazão.

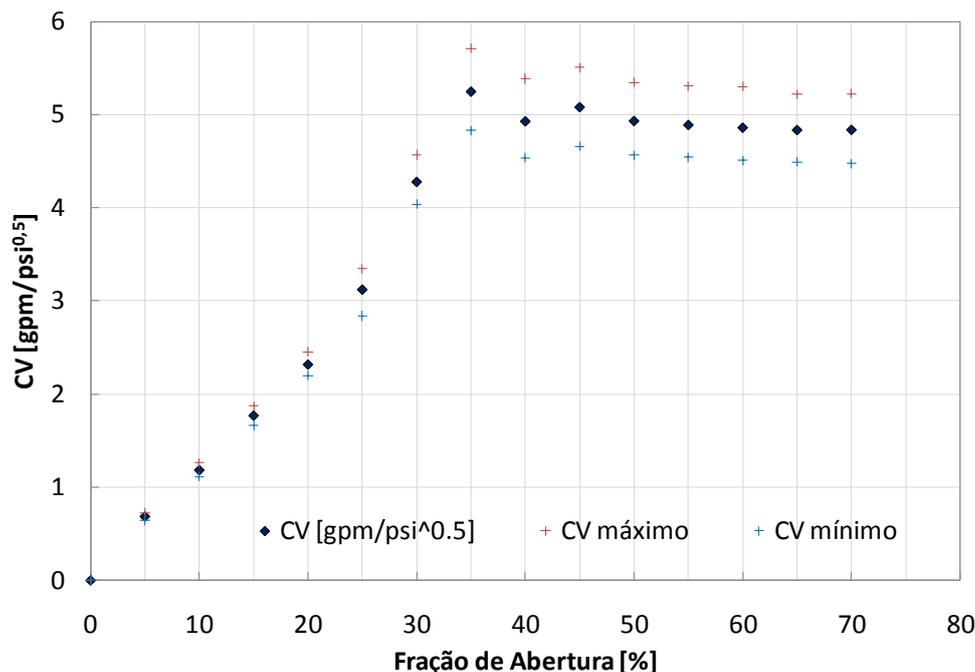


Figura 6.5 – Coeficiente de vazão válvula de alívio testada.

6.2. Coeficiente de Descarga da Válvula de Bloqueio

O coeficiente de descarga da válvula de bloqueio em função da posição de abertura é uma informação requerida como dado de entrada para o simulador computacional utilizado. Para prover esta informação, foram realizados experimentos para levantar a curva do coeficiente de descarga em relação a sua posição. A curva foi levantada através de dados fornecidos pelo fabricante e de dados experimentais. O manual de seleção e instalação do fabricante MIPEL apresenta o coeficiente de perda de carga máximo para as válvulas fabricadas por ele. Com os dados apresentados no item 5.7 verificou-se no manual da MIPEL que o coeficiente de descarga máximo para uma válvula esfera de 2 polegadas com passagem reduzida é de 1,72.

Para uma vazão constante de 4 m³/h é conhecido que a pressão absoluta logo após a válvula de bloqueio na linha de retorno é de 1,37 kgf/cm². Logo, variou-se o ângulo de abertura de 10 em 10 graus com uma vazão constante de 4 m³/h para se obter o coeficiente de descarga da válvula.

Conhecendo o diâmetro de passagem da válvula de 1141,933 mm² (1,77 pol²) apresentado no catálogo do fabricante, Anexo 9.10, calculou-se a

pressão a montante necessária para obter o coeficiente de descarga máximo, com a válvula totalmente aberta, através da Equação 13. Os demais pontos foram calculados pela mesma equação levando em consideração os dados experimentais adquiridos. A Figura 6.6 apresenta a curva do coeficiente de descarga da válvula de bloqueio levantada com dados experimentais e do fabricante.

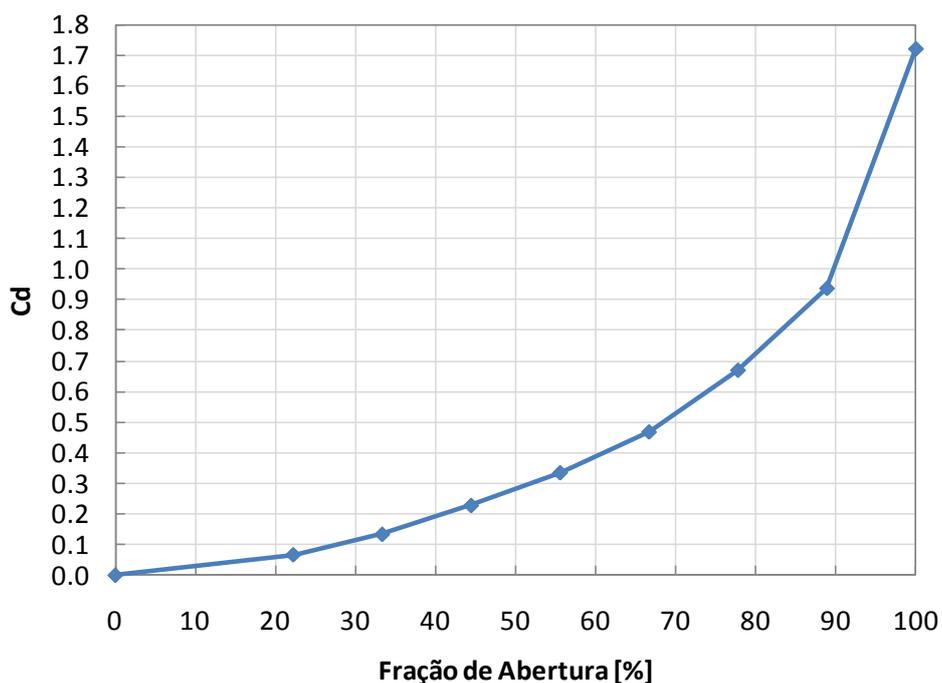


Figura 6.6 – Coeficiente de descarga da válvula de bloqueio.

Após conhecer a curva do coeficiente de descarga da válvula de bloqueio converteu-se a mesma para coeficiente de vazão em $\text{gpm/psi}^{0.5}$ para inseri-la no programa de simulação que será utilizado. A Figura 6.7 apresenta a curva do coeficiente de vazão da válvula de bloqueio em função do percentual de abertura.

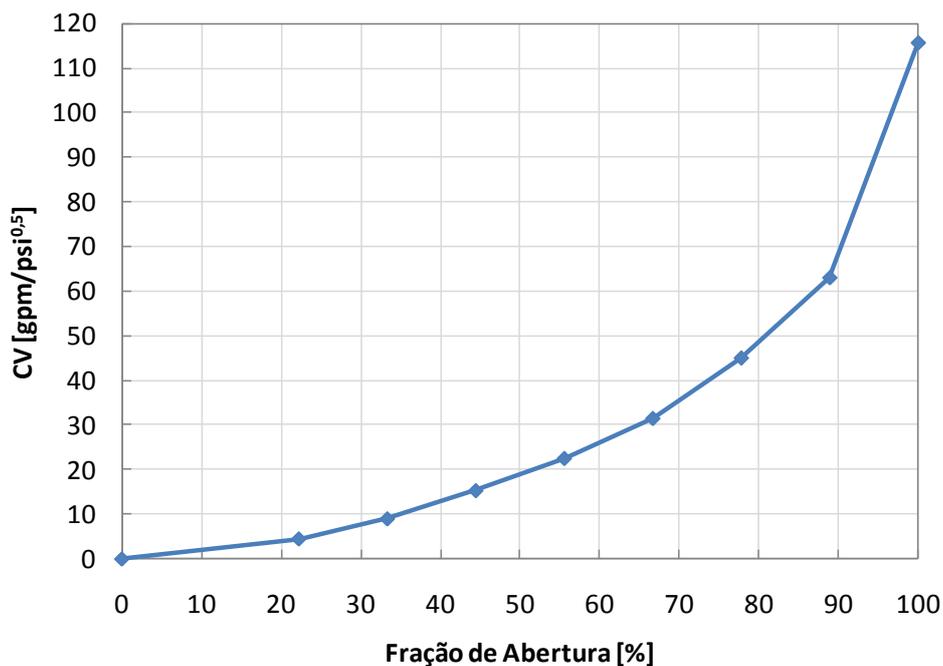


Figura 6.7 – Coeficiente de vazão da válvula de bloqueio.

6.3.

Ensaio de Bloqueio do Duto sem a Presença da Válvula de Alívio

Os testes transientes constituem-se nos principais resultados do presente trabalho. Ensaio de bloqueio do duto do circuito testes sem a presença da válvula de alívio foram realizados. Estes testes foram conduzidos para auxiliar na validação dos resultados do simulador computacional. Também, estes testes tiveram como objetivo identificar as taxas de crescimento da pressão associadas com os diferentes valores dos tempos de bloqueio testados. Propõe-se no presente trabalho que a resposta da válvula de bloqueio seja avaliada tendo em vista as taxas de crescimento da pressão e não a classificação dos eventos apresentada anteriormente que utilizava o período de propagação do pulso de pressão no duto.

A Tabela 6.1 apresenta os resultados obtidos para as taxas de crescimento da pressão a montante da válvula de bloqueio do circuito de testes, para as vazões iniciais de 4,5 e 5,5 m³/h e para diferentes tempos de bloqueio. Estas taxas foram calculadas ajustando-se dois pontos de medida de pressão na região inicial linear após o bloqueio.

Tabela 6.1 – Taxa de crescimento da pressão após bloqueio da linha. Sem a válvula de alívio.

Vazão inicial	Tempo de curso da válvula de bloqueio	Taxa de crescimento da pressão sem PRV
m ³ /h	s	(kgf/cm ²) / s
4,5	0,2	180
	0,3	83
	0,5	49
	0,8	28
	1,0	24
	1,5	15
5,5	0,2	166
	0,3	101
	0,5	52
	0,8	33
	1,0	27
	1,5	18

6.4.

Ensaio de Bloqueio do Duto com a Presença da Válvula de Alívio

Estes testes foram divididos em dois grupos. A Tabela 6.2 apresenta a matriz de testes realizados. Na tabela pode ser verificado que os testes foram conduzidos com duas rotações da bomba proporcionando dois valores de vazão de alívio. A bomba operando a 2950 rpm proporcionava uma pressão de vazão nula (*shut off*) de 31,23 metros de coluna de água, produzindo uma vazão de alívio de 2 m³/h. Com a bomba operando a 3350 rpm, obtinha-se um *shut off* de 40,27 mca e uma vazão de alívio de 3,7 m³/h, vazão esta igual ao valor nominal da vazão de alívio para a válvula de alívio utilizada nos testes.

Para cada rotação associada à vazão inicial, foram realizados bloqueios do circuito fechando-se a válvula de bloqueio de esfera com tempos diferentes, como indicado na Tabela 6.2. O tempo de bloqueio relacionado apresentado na tabela é o tempo que a válvula leva da posição totalmente aberta para a posição totalmente fechada.

Tabela 6.2 – Matriz de Testes.

Rotação da Bomba [rpm]	Vazão Inicial [m³/h]	Vazão de Alívio [m³/h]	Tempo de Bloqueio [s]
2950	4,5	2,0	0,2
			0,3
			0,5
			0,8
			1,0
			1,5
3350	5,9	3,7	0,2
			0,3
			0,5
			0,8
			1,0
			1,5

É interessante ressaltar que as variações de pressão em um duto são classificadas na literatura em três tipos [9]. Esta classificação é dependente da relação entre o tempo necessário para a mudança de velocidade do fluido, T , que corresponde ao tempo de bloqueio do circuito de testes, com o período do duto, $2L/c$, o qual representa o tempo de propagação que a onda de pressão leva para ir e voltar no duto. Na expressão para o período do duto, L é o comprimento do duto e c a velocidade de propagação da onda de pressão no meio.

De acordo com a literatura um evento é classificado como sendo rápido quando as variações no escoamento ocorrem em escalas de tempo menores que o período do duto, ou seja,

$$T \leq \frac{2L}{c} \quad (26)$$

Um evento é classificado como lento quando as variações no escoamento ocorrem em escalas de tempo da ordem de 1 a 500 períodos do duto, i.e.,

$$\frac{2L}{c} \leq T \leq 500 \frac{2L}{c} \quad (27)$$

Um evento é classificado como muito lento quando as variações no escoamento ocorrem para escalas de tempo maiores que 500 quando a mudança no escoamento é maior do que 500 períodos do duto,

$$T \geq 500 \frac{2L}{c} \quad (28)$$

No presente estudo serão realizados bloqueios do duto principal da seção de testes com tempos entre 1,5 e 0,2 segundos, utilizando água como fluido de trabalho ($c = 1200\text{m/s}$), onde o trecho da descarga da bomba até a válvula de bloqueio é de aproximadamente 4 metros. Logo, os eventos transientes são considerados lentos, de acordo com a classificação apresentada anteriormente.

Ressalta-se que em dutos longos é comum serem observados fechamentos rápidos mesmo que o bloqueio do duto se dê em minutos, pois os comprimentos dos dutos são muito grandes.

6.4.1. Pressão de Ajuste da Válvula de Alívio

A pressão para a qual a válvula de alívio se abre é uma informação importante que caracteriza o seu comportamento dinâmico. Para as condições dos ensaios transientes apresentados na Tabela 6.2, foi possível verificar nos dados adquiridos pelo sistema de aquisição de dados o momento de abertura da válvula indicado pelo sensor de deslocamento LVDT. Os dados adquiridos permitem também associar a posição da válvula com a pressão a montante, o que fornece a pressão de abertura da válvula.

Nos testes conduzidos, o momento de abertura da válvula foi caracterizado analisando os gráficos de pressão a montante e de fração de abertura. Quando a fração de abertura atingia valor acima de 0,5% ou 0,005, a pressão a montante

correspondente era designada como sendo a pressão de abertura da válvula. Cada teste foi conduzido duas vezes.

A Figura 6.8 apresenta um exemplo de gráfico analisado mostrando os resultados obtidos para uma rotação da bomba de 3350 rpm, 5,9 m³/h de vazão inicial e tempo de bloqueio de 0,5 s. A Tabela 6.3 apresenta os resultados para as pressões de abertura para todos os testes conduzidos.

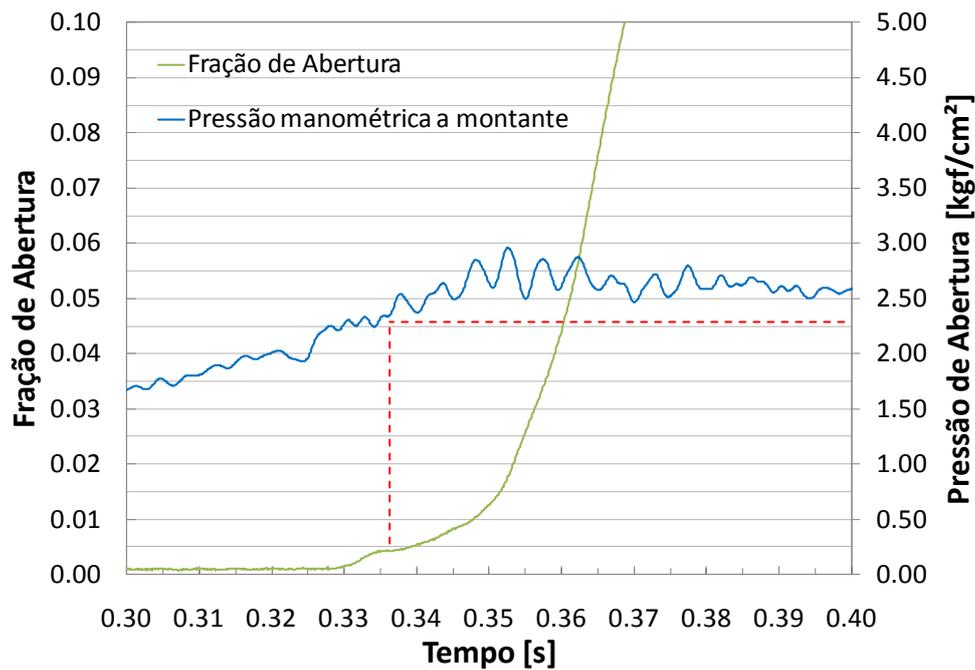


Figura 6.8 – Determinação da pressão de abertura da válvula de alívio a partir dos dados de pressão e deslocamento da válvula de alívio para vazão inicial de 5,9 m³/h, rotação da bomba de 3350 rpm e tempo de bloqueio de 0,5 s.

Tabela 6.3 – Pressões de abertura.

Vazão inicial	Tempo de fechamento da válvula de bloqueio	Pressão de abertura no Teste 1	Pressão de abertura no Teste 2
m ³ /h	s	kgf/cm ²	kgf/cm ²
4,5	0,2	2,44	2,49
	0,3	2,42	2,45
	0,5	2,41	2,35
	0,8	2,31	2,40
	1,0	2,23	2,20
	1,5	2,26	2,23
5,9	0,2	2,38	2,46
	0,3	2,41	2,43
	0,5	2,31	2,35
	0,8	2,33	2,31
	1,0	2,22	2,24
	1,5	2,25	2,23
Pressão de Abertura Média		2,34	kgf/cm²

A pressão de abertura média da válvula de alívio testada obtida nos ensaios foi de 2,34 kgf/cm², diferente da pressão de 2,07 kgf/cm² declarada no certificado da válvula, Anexo 9.3. Acredita-se que esta diferença se deve ao procedimento de calibração da válvula utilizado pelo fabricante que se dá de forma quase estática, e aquele utilizado nos experimentos realizados no presente trabalho que foi realizado para uma condição de operação transiente da válvula.

6.4.2. Sobrepressão da Válvula de Alívio

A análise dos dados medidos também permitiu determinar o valor da sobrepressão da válvula nos testes realizados. Nos cálculos, considerou-se o valor de 2,34 kgf/cm² como sendo o valor de pressão de ajuste da válvula. A

Tabela 6.4 apresenta os valores de sobrepressão devido a máxima pressão verificada no processo de abertura da válvula de alívio.

Tabela 6.4 – Sobrepressão máxima.

Vazão de Alívio	Tempo de curso da válvula de bloqueio	Pressão Máxima de Abertura Teste 1	Sobrepressão Máxima Teste 1	Pressão Máxima de Abertura Teste 2	Sobrepressão Máxima Teste 2
m ³ /h	s	kgf/cm ²	%	kgf/cm ²	%
2,02	0,2	3,65	56,32	3,62	54,92
	0,3	3,20	36,90	3,34	42,93
	0,5	3,00	28,35	3,01	28,69
	0,8	2,93	25,53	2,96	26,72
	1,0	2,92	24,84	2,97	27,07
	1,5	2,95	26,34	2,95	26,00
3,65	0,2	3,48	49,01	3,55	52,00
	0,3	3,18	35,96	3,17	35,71
	0,5	2,85	21,80	2,88	23,05
	0,8	2,74	17,14	2,84	21,46
	1,0	2,75	17,57	2,80	19,88
	1,5	2,70	15,35	2,73	16,97

Como a válvula de alívio testada no presente trabalho era uma válvula certificada, a sobrepressão no regime permanente de alívio, na vazão de alívio nominal da válvula de 3,7 m³/h, deveria ser de até 10%.

Tabela 6.5 – Sobrepressão no regime permanente de alívio.

Vazão de Alívio	Pressão no regime permanente de alívio	Sobrepressão no regime permanente de alívio
m ³ /h	kgf/cm ²	%
2,02	2,47	5,51
3,65	2,75	17,48

Durante os testes, a sobrepressão apresentou-se maior do que o esperado. Para os tempos de bloqueio superiores a 0,8 s a sobrepressão ficou abaixo dos 25% na maioria dos testes. Mesmo na vazão de alívio nominal em regime permanente, a válvula apresentou sobrepressão acima de 10%, Tabela 6.5. Logo, acredita-se que a válvula testada tem o comportamento de uma válvula não certificada, as quais podem apresentar sobrepressão de até 25%, mesmo sendo adquirida como uma válvula certificada.

Analisando as sobrepressões na Tabela 6.4 e as taxas de crescimento da pressão apresentadas na Tabela 6.1, observa-se que para uma taxa de crescimento aproximadamente superior a 50 kgf/cm²/s a válvula não tem um comportamento satisfatório. Bloqueios insatisfatórios são considerados aqueles onde a sobrepressão ultrapassou o patamar de 25%, considerado o valor máximo para válvulas de alívio não certificadas. Estes valores foram calculados considerando-se a pressão de abertura média de 2,34 kgf/cm² e que se trata de uma válvula não certificada (sobrepressão máxima de 25%). A Figura 6.9 apresenta a variação da taxa de crescimento da pressão na linha de testes sem a presença da válvula de alívio em função do tempo de bloqueio para as duas vazões iniciais ensaiadas.

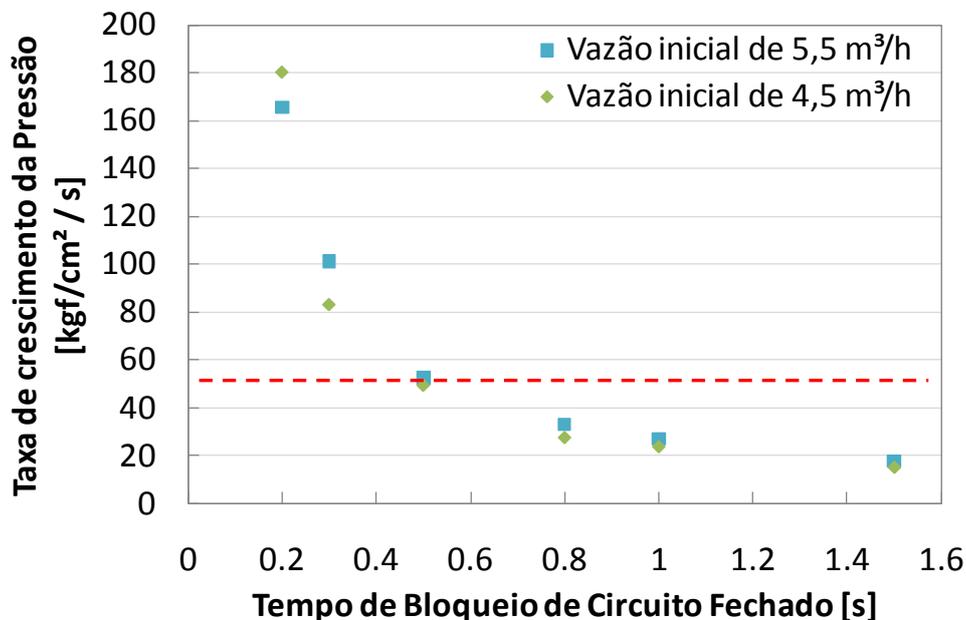


Figura 6.9 – Variação da taxa de crescimento da pressão em função do tempo, após o bloqueio da linha, sem a presença de válvula de alívio.

6.5. Comparação dos Resultados Experimentais com os Modelos Matemáticos

Nesta seção serão apresentados resultados comparativos entre os dados experimentais medidos no presente trabalho e soluções analíticas ou numéricas.

6.5.1. Previsão do Salto de Pressão: Comparação com a Equação de Joukowsky

A previsão da máxima pressão em um duto após o bloqueio do escoamento é feita de maneira simplificada assumindo-se o escoamento sem atrito e uma variação instantânea da velocidade do escoamento de seu valor antes do bloqueio para zero imediatamente após o bloqueio. Com estas hipóteses as equações de conservação de massa e quantidade de movimento linear em suas formas unidimensionais fornecem a relação entre a variação da velocidade e o salto na pressão logo após o bloqueio. Esta relação é dada pela Equação (29), conhecida como equação de Joukowsky,

$$h_a = \frac{c}{g} \Delta v \quad (29)$$

onde,

h_a – aumento de pressão dado em metros de coluna de líquido (m)

c – velocidade de propagação da onda sonora no meio (m/s)

g – aceleração da gravidade (m/s²)

Δv – Variação da velocidade do fluido (m/s)

A Tabela 6.6 apresenta a comparação entre o salto de pressão medido nos experimentos e previsto pela equação de Joukowsky. A comparação é apresentada para dois valores de vazões e para a condição de fechamento da válvula de bloqueio mais rápida ensaiada, i.e, 0,2 s. Pelo critério da literatura discutido anteriormente, este tempo de fechamento em nossas seções de testes

é ainda considerado lento. Portanto, é de se esperar uma diferença apreciável entre as previsões da equação de Joukowsky e as medições, especialmente para a vazão mais alta.

Tabela 6.6 – Saltos de pressão.

Vazão inicial	Salto de pressão medido	Salto de pressão por Joukowsky	Diferença percentual
m ³ /h	kgf/cm ² s	kgf/cm ²	%
4,5	5,68	6,79	16,33
5,5	6,57	8,30	20,87

6.5.2. Influência do Ancoramento na Velocidade de Propagação

É importante mencionar que para as características do fluido e dimensões adotadas na seção de testes, a influência do ancoramento não se mostrou relevante. A Tabela 6.7 traz a velocidade de propagação do som calculada para três tipos de ancoramento, de acordo com a formulação clássica encontrada na literatura [10] e reproduzida abaixo,

$$c^2 = \frac{K / \rho}{1 + [(K/E)(D/e)]c_1} \quad (30)$$

onde,

c – velocidade de propagação da onda de pressão [m/s]

K – módulo de Bulk [Pa]

ρ - massa específica [kg/m³]

D – diâmetro externo [m]

e – espessura da parede do tubo [m]

E – módulo de elasticidade do aço [Pa]

O coeficiente c_1 é definido para três tipos de ancoramento da tubulação como:

a) Tubulação ancorada apenas na sua extremidade a montante.

$$c_1 = 1 - \frac{\mu}{2}$$

b) Tubulação ancorada contra o movimento axial.

$$c_1 = 1 - \mu^2$$

c) Tubulação ancorada com juntas de dilatação.

$$c_1 = 1$$

onde, μ é o coeficiente de Poisson.

Tabela 6.7 – Velocidades de propagação da onda de pressão por tipo de ancoramento.

Tipo de Ancoramento	Velocidade de propagação [m/s]
a) Tubulação ancorada apenas na sua extremidade a montante	1357
b) Tubulação ancorada contra o movimento axial	1349
c) Tubulação ancorada com juntas de dilatação	1338

6.6. Comparação das Simulações Numéricas com Resultados Experimentais

Nesta seção serão apresentadas comparações entre as previsões fornecidas pelas simulações computacionais e os resultados experimentais obtidos nos ensaios conduzidos. A apresentação será iniciada pela comparação entre experimentos e simulação para a condição de bloqueio da linha de testes por meio da válvula de bloqueio sem a presença da válvula de alívio. Esta é uma condição mais simples que serve para avaliar a qualidade do modelo de simulação utilizado. Em seguida, são apresentadas as comparações entre simulação e experimento do comportamento transiente da linha para o caso onde a válvula de alívio atua, objetivo principal do presente trabalho.

6.6.1.

Comparação entre Simulação e Experimentos para Bloqueios sem a Presença da Válvula de Alívio

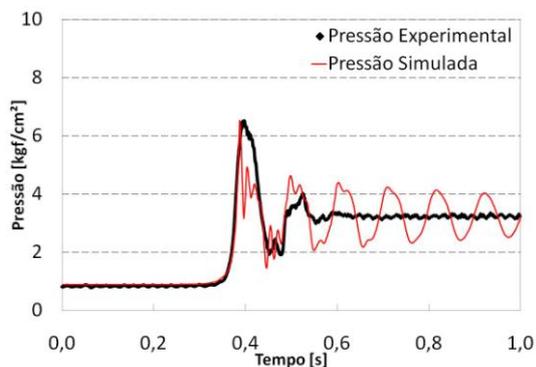
Na Figura 6.10 são apresentados os resultados das comparações numéricas e experimentais para pressão a montante da válvula de bloqueio. São apresentados resultados para a condição com vazão inicial de 4,5m³/h e diferentes tempos de fechamento, sem a presença da válvula de alívio. A modelagem numérica do escoamento transiente de água na configuração da seção de testes foi implementada no programa comercial Stoner Pipeline Simulator – SPS, como descrito no Capítulo 5.

A Figura 6.10 (a) apresenta o comportamento da pressão a montante da válvula de bloqueio como função do tempo ao longo do evento de fechamento da válvula de bloqueio. Na figura, os losangos pretos representam os dados experimentais, enquanto a linha vermelha os resultados da simulação. Os resultados da figura correspondem ao caso de vazão de 4,5 m³/h e um tempo de fechamento da válvula de bloqueio de 0,2 segundos.

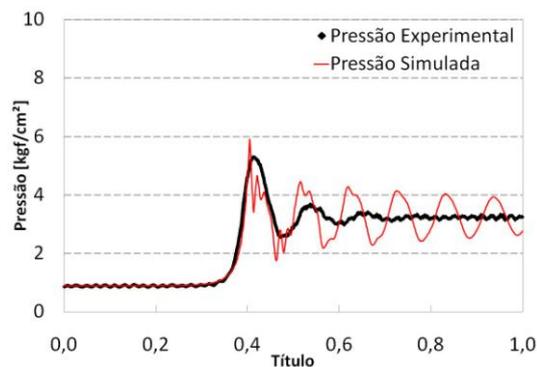
Uma análise dos resultados apresentados na Figura 6.10 mostra que os resultados numéricos reproduziram muito bem a variação de pressão desde o momento do início do fechamento da válvula até o instante onde o pico de pressão é atingido. Em particular, o valor do pico de pressão foi previsto com exatidão pelo modelo numérico. A partir do instante da passagem do pico de pressão, a solução numérica apresenta algumas oscilações que diferem daquelas medidas pelo transdutor de pressão. No entanto, os instantes onde ocorrem o primeiro vale e o segundo pico de pressão, assim como suas amplitudes, são bem previstas. A partir do instante do segundo pico de pressão os resultados experimentais mostram uma rápida atenuação das oscilações na pressão, enquanto os resultados numéricos ainda apresentam significativas oscilações. Atribuí-se estas diferenças às condições de contorno de pressão constante no tanque de alimentação onde, na realidade, a pressão pode estar variando e amortecendo o transiente.

Para um tempo de fechamento de bloqueio maior, Figura 6.10 (b), o comportamento geral da comparação entre experimentos e simulação é o mesmo que aquele descrito para o fechamento mais rápido ilustrado na Figura

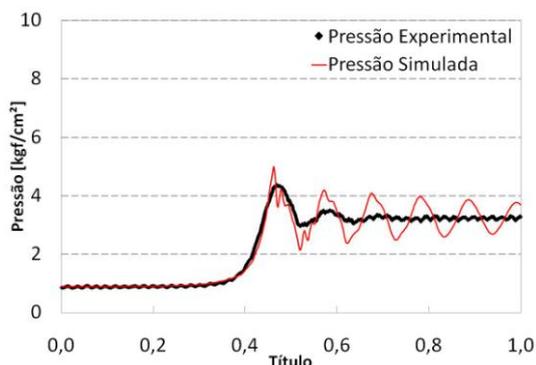
6.10 (a). Verifica-se, no entanto, uma pequena super-estimativa da amplitude do primeiro pico de pressão. A mesma tendência é verificada para os outros tempos de bloqueio apresentados da Figura 6.10 (c) a Figura 6.10 (f), onde as amplitudes das ondas de pressão são consideravelmente menores.



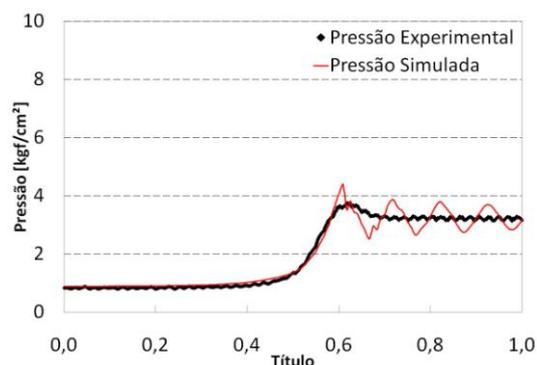
(a) Bloqueio em 0,2 s



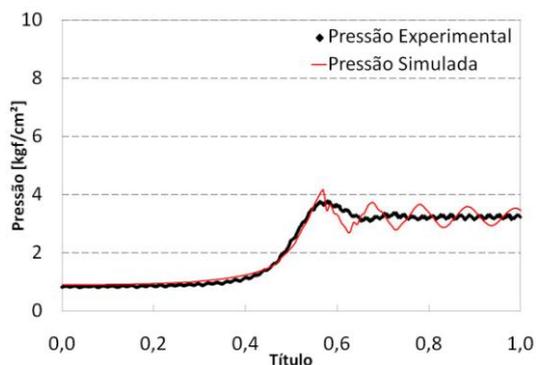
(b) Bloqueio em 0,3 s



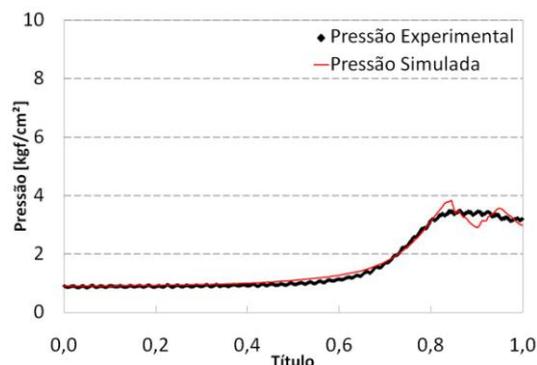
(c) Bloqueio em 0,5 s



(d) Bloqueio em 0,8 s



(e) Bloqueio em 1,0 s

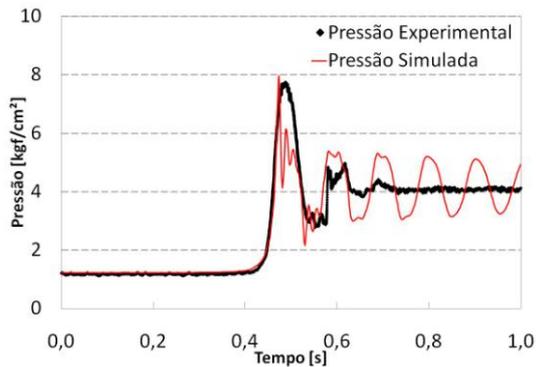


(f) Bloqueio em 1,5 s

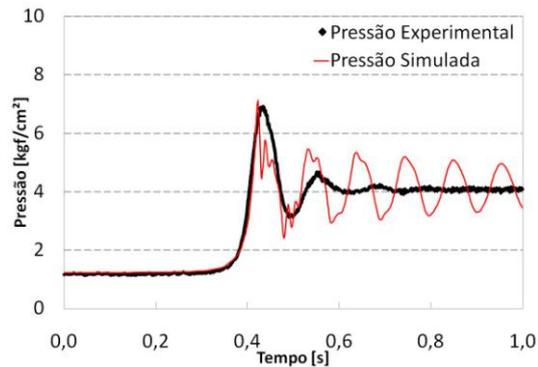
Figura 6.10 – Comparação entre experimentos e simulação para a pressão a montante da válvula de bloqueio sem a presença da válvula de alívio. Vazão de 4,5 m³/h e diferentes tempos de bloqueio.

Na Figura 6.11 são apresentadas as comparações da pressão a montante da válvula de bloqueio experimental e simulada sem a presença da válvula de alívio, para uma vazão inicial de $5,5 \text{ m}^3/\text{h}$ e para os mesmos tempos de fechamento apresentados para o caso da vazão menor.

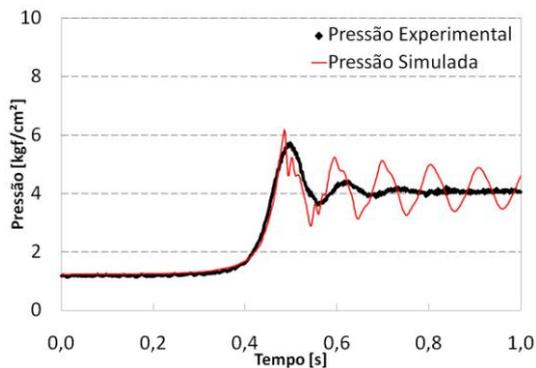
Observa-se nas figuras um comportamento qualitativo entre as soluções numéricas e os dados experimentais similares àquele descrito para o caso da vazão de $4,5 \text{ m}^3/\text{h}$ apresentados da Figura 6.10.



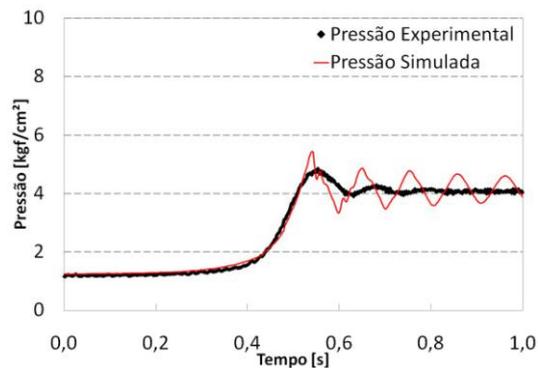
(a) Bloqueio em 0,2 s



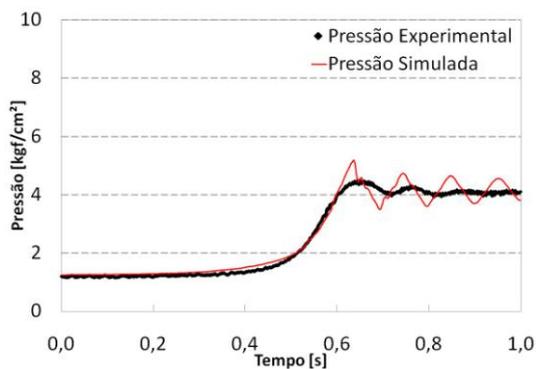
(b) Bloqueio em 0,3 s



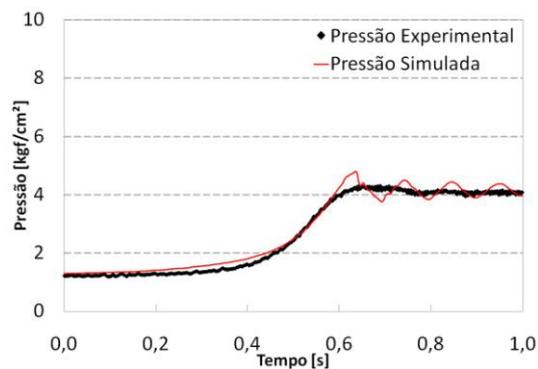
(c) Bloqueio em 0,5 s



(d) Bloqueio em 0,8 s



(e) Bloqueio em 1,0 s



(f) Bloqueio em 1,5 s

Figura 6.11 – Comparação entre experimentos e simulação para a pressão a montante da válvula de bloqueio sem a presença da válvula de alívio. Vazão de 5,5 m³/h e diferentes tempos de bloqueio.

6.6.2.

Comparação entre Simulação e Experimentos para Bloqueios com a Presença da Válvula de Alívio

Nesta seção são apresentados os principais resultados do presente trabalho. Da Figura 6.12 a Figura 6.23 são apresentadas as comparações entre os resultados experimentais medidos na seção de testes construída, com as simulações numéricas para a configuração onde a válvula de alívio está presente. São apresentadas comparações para as pressões a montante e a jusante da válvula de alívio, para a vazão através da válvula de alívio, assim como para a fração de abertura da válvula. As comparações foram realizadas para uma condição de operação da bomba a 2950 rpm e uma vazão de alívio de 2,0 m³/h e para 3350 rpm e uma vazão de alívio de 3,7 m³/h.

A Figura 6.12 apresenta os resultados comparativos entre experimentos e simulação referentes à condição mais com 2950 rpm, qual seja, o fechamento da válvula de bloqueio em 0,2 segundos. São apresentados resultados para as pressões a montante (a) e a jusante (b) da válvula de alívio, vazões (c) e fração de abertura (d).

A legenda da figura indica os diferentes modelos de simulação utilizados na comparação com os resultados experimentais. **P-** e **P+** indicam pressão a montante e a jusante da válvula de alívio respectivamente. O símbolo **BR** corresponde aos dados fornecidos pelo modelo utilizado na indústria de dutos no Brasil. O símbolo **SPS** indica os dados fornecidos pelo modelo do Stoner Pipeline Simulator, enquanto a nomenclatura **Modelo Proposto** corresponde aos resultados obtidos com o modelo de comportamento dinâmico da válvula proposto na presente Dissertação. Os dados experimentais obtidos no presente trabalho estão associados à legenda **Medido** na figura.

• Bloqueio em 0,2 segundos e vazão de alívio de 2,0 m³/h

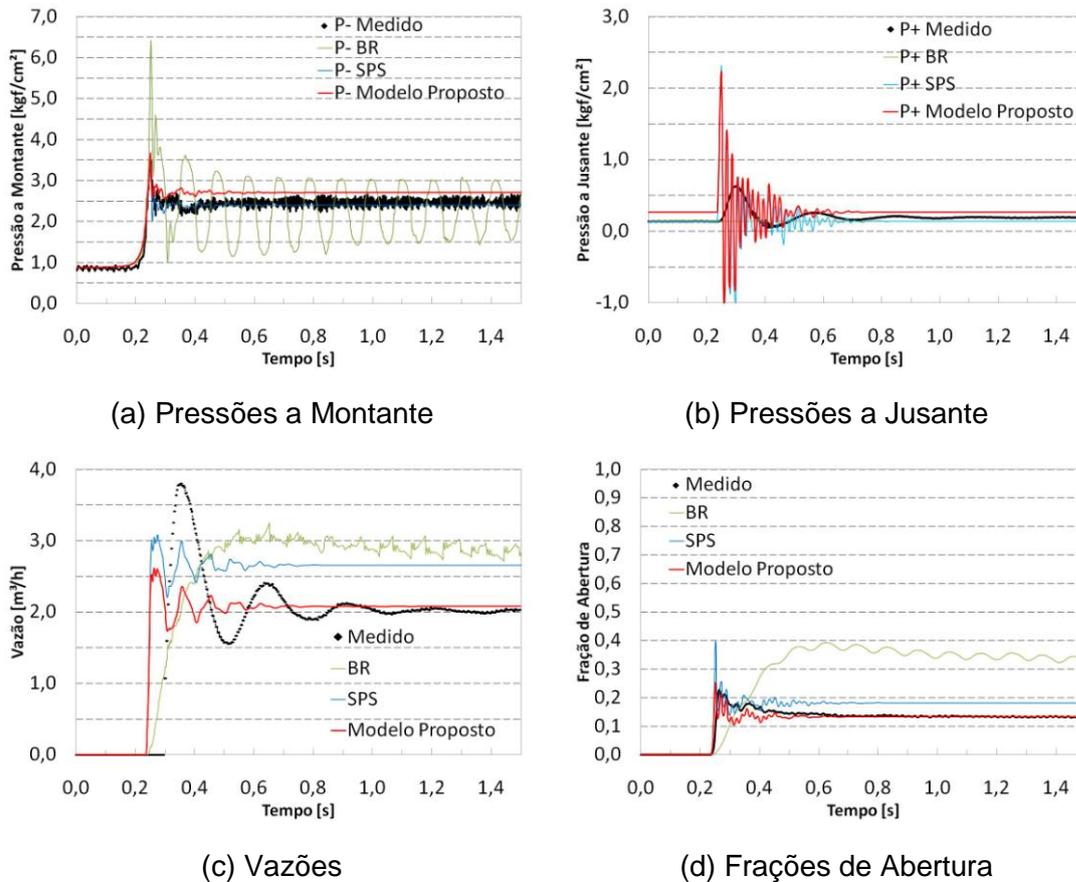


Figura 6.12 – Comportamento das pressões a montante e jusante da válvula de alívio, vazões e frações de abertura para bloqueio em 0,2 s e vazão de alívio de 2,0 m³/h.

Uma observação dos resultados experimentais apresentados na Figura 6.12 (a) e (b) mostra um comportamento esperado para a pressão a montante e a jusante da válvula de alívio. A pressão a montante é constante em um patamar baixo até o momento do bloqueio da linha onde observa-se um forte aumento da pressão seguido de oscilações de amplitude decrescente até uma estabilização da pressão em um nível mais elevado que aquele do valor antes do bloqueio, devido à maior perda de carga imposta pela válvula de alívio por onde passa a vazão de água após o bloqueio.

Dos três modelos de simulação testados, o modelo BR apresenta os piores níveis de concordância com os experimentos. Nota-se que a amplitude do pico de pressão foi fortemente sobre-estimada, e que as ondas de pressão não são atenuadas à mesma taxa que os experimentos. Os outros dois modelos, SPS e

Modelo Proposto, apresentam boa concordância com os experimentos, prevendo de modo satisfatório tanto o valor do pico de pressão como as taxas de atenuação e o valor limite da pressão a montante da válvula de alívio.

Uma análise sobre a razão da discrepância entre as previsões do modelo BR em relação aos dados experimentais e em relação aos outros dois modelos leva a conclusões importantes, talvez a contribuição mais importante do presente trabalho no que diz respeito à utilização no campo de válvulas de alívio.

Os três modelos testados utilizam o mesmo programa de simulação de transientes hidráulicos, o Stoner Pipeline Simulation, um programa muito difundido na indústria. A diferença entre as três soluções está na modelagem do comportamento dinâmico da válvula de alívio implementada no simulador SPS. Dos três modelos de válvula de alívio, apenas o modelo BR não utiliza uma curva de coeficiente de descarga da válvula como função da abertura da válvula. Este modelo utiliza apenas informações sobre área do orifício da válvula, pressão de abertura, percentual de sobre pressão e contrapressão de alívio. Nota-se por esta comparação entre modelos que a informação sobre a variação do coeficiente de descarga da válvula é fundamental para uma boa previsão de seu comportamento dinâmico e, por consequência, dos níveis de pressão que impõe na linha principal a ser protegida.

Informações sobre a variação do coeficiente de descarga em função do percentual de abertura de válvulas de alívio não são fornecidas pelos fabricantes das válvulas. Os resultados apresentados no presente trabalho apresentam uma forte justificativa para que normas de dimensionamento e utilização de válvulas de alívio sejam alteradas e passem a exigir o fornecimento destas informações.

A Figura 6.12 (c) apresenta a comparação entre a vazão aliviada pela válvula após o bloqueio medida nos experimentos com aquelas previstas pelos três modelos de simulação testados.

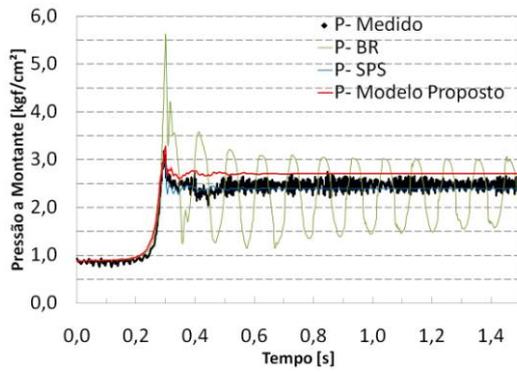
Também para o caso da vazão alívio, as previsões do modelo BR são muito distantes dos valores medidos. Percebe-se na figura que o modelo não foi capaz nem mesmo de prever o comportamento qualitativo da vazão. Os outros dois modelos preveem o comportamento oscilatório da vazão, sendo o Modelo Proposto capaz de prever com boa exatidão o valor limite da vazão. A defasagem verificada na posição do pico de vazão entre experimentos e os modelos SPS e Proposto podem ser creditadas à inércia do medidor de vazão

do tipo turbina utilizado para medir a vazão aliviada pela válvula, como será comentado mais adiante.

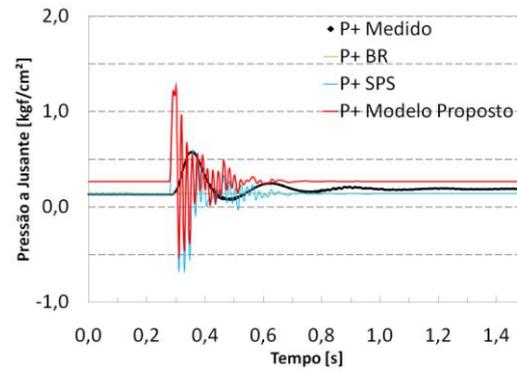
A Figura 6.12 (d) apresenta a comparação entre as frações de abertura da válvula de alívio medidas e previstas pelos três modelos testados. Mais uma vez, pode-se verificar que o modelo BR é incapaz de prever o comportamento qualitativo da fração de abertura fornecendo resultados bem afastados daqueles medidos. Os modelos SPS e o Modelo Proposto apresentam boa concordância com os experimentos, especialmente o Modelo Proposto. A análise destes resultados reforça a conclusão comentada anteriormente com relação ao comportamento da pressão que enfatiza a necessidade do fornecimento ao simulador de escoamento de informações sobre a relação entre o coeficiente de descarga e a fração de abertura da válvula.

A seguir são apresentados da Figura 6.13 a Figura 6.17 os resultados comparativos obtidos para os outros tempos de fechamento da válvula de bloqueio ensaiados. As conclusões gerais comentadas com relação ao transiente de 0,2 s são pertinentes também para estes resultados.

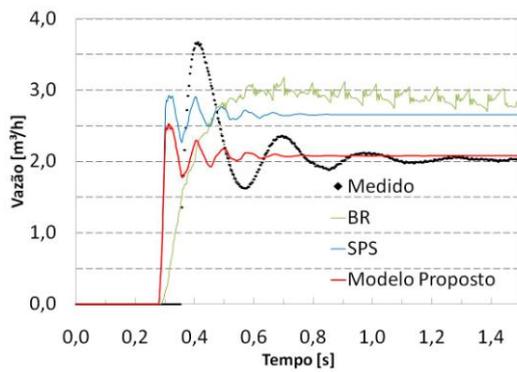
- Bloqueio em 0,3 segundos e vazão de alívio de 2,0 m³/h



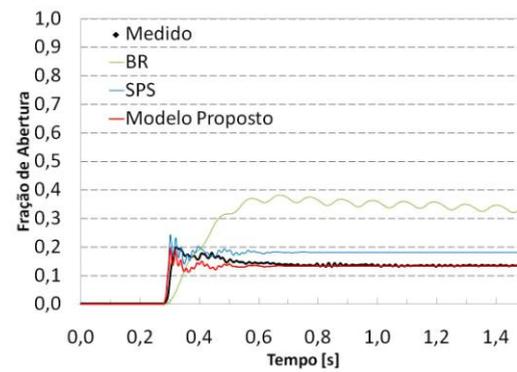
(a) Pressões a Montante



(b) Pressões a Jusante



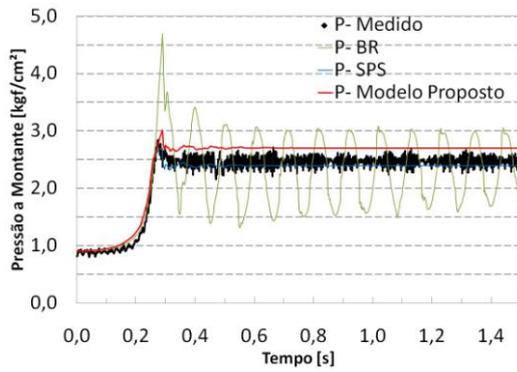
(c) Vazões



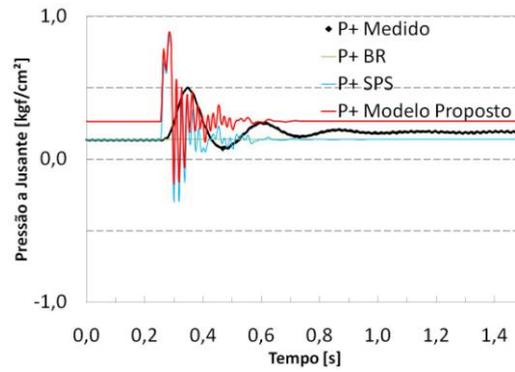
(d) Frações de Abertura

Figura 6.13 – Comportamento das pressões a montante e jusante da válvula de alívio, vazões e frações de abertura para bloqueio em 0,3 s e vazão de alívio de 2,0 m³/h.

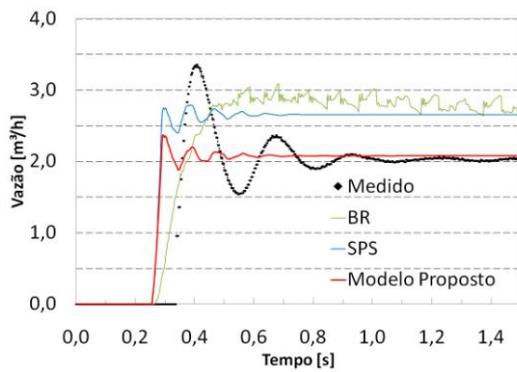
- Bloqueio em 0,5 segundos e vazão de alívio de 2,0 m³/h



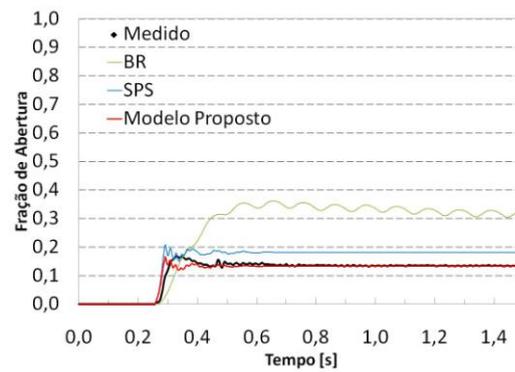
(a) Pressões a Montante



(b) Pressões a Jusante



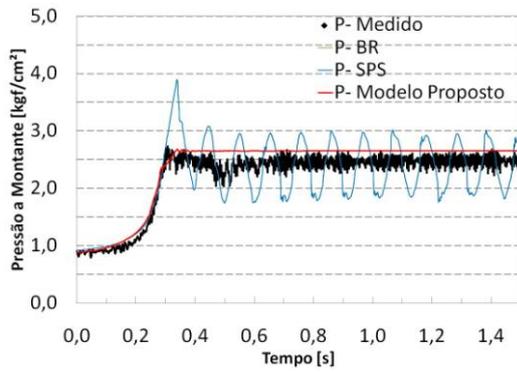
(c) Vazões



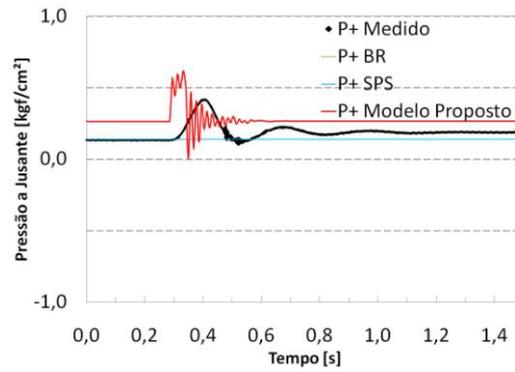
(d) Frações de Abertura

Figura 6.14 – Comportamento das pressões a montante e jusante da válvula de alívio, vazões e frações de abertura para bloqueio em 0,5 s e vazão de alívio de 2,0 m³/h.

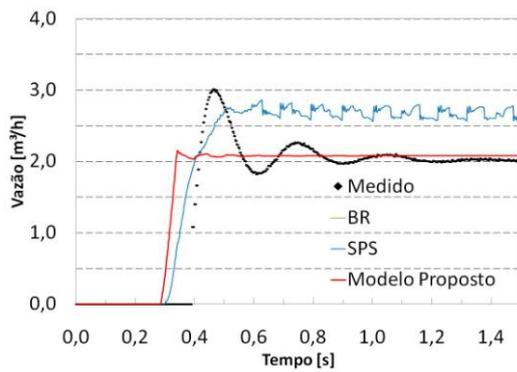
- Bloqueio em 0,8 segundos e vazão de alívio de 2,0 m³/h



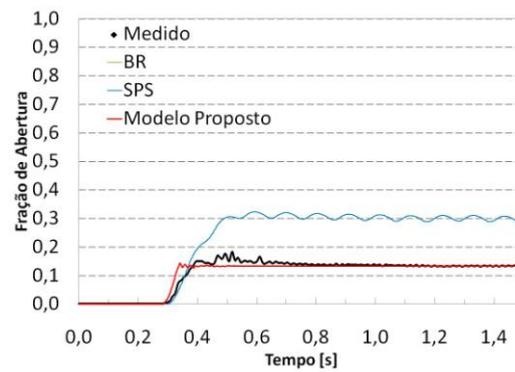
(a) Pressões a Montante



(b) Pressões a Jusante



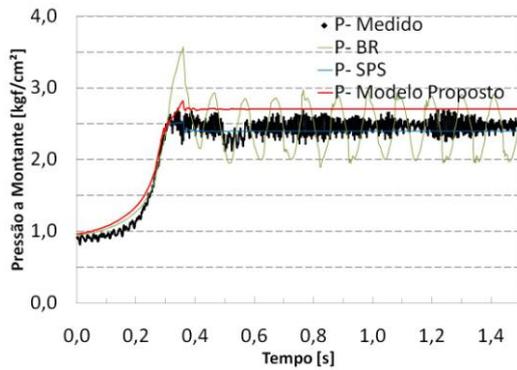
(c) Vazões



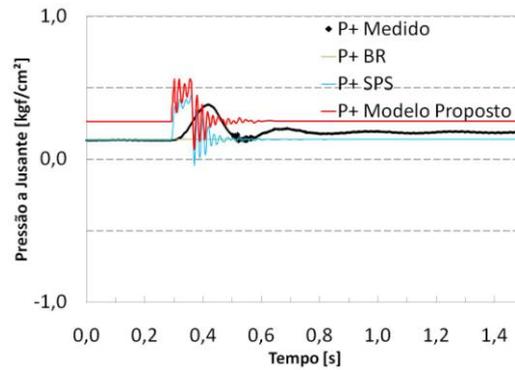
(d) Frações de Abertura

Figura 6.15 – Comportamento das pressões a montante e jusante da válvula de alívio, vazões e frações de abertura para bloqueio em 0,8 s e vazão de alívio de 2,0 m³/h.

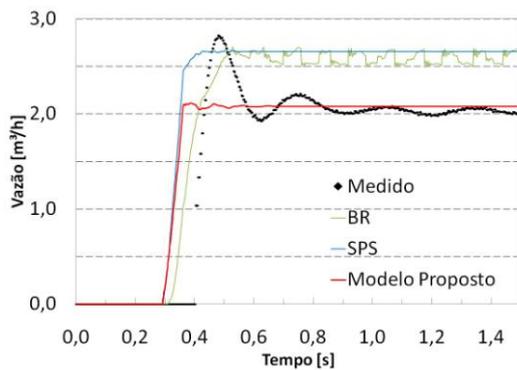
- Bloqueio em 1,0 segundos e vazão de alívio de 2,0 m³/h



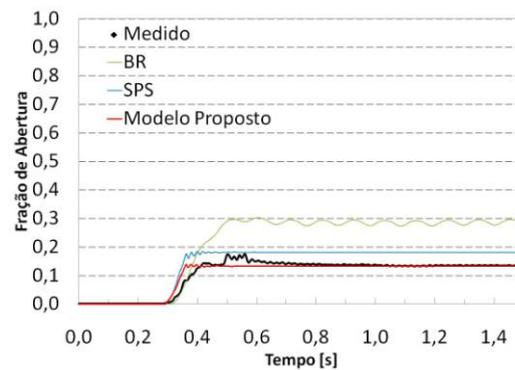
(a) Pressões a Montante



(b) Pressões a Jusante



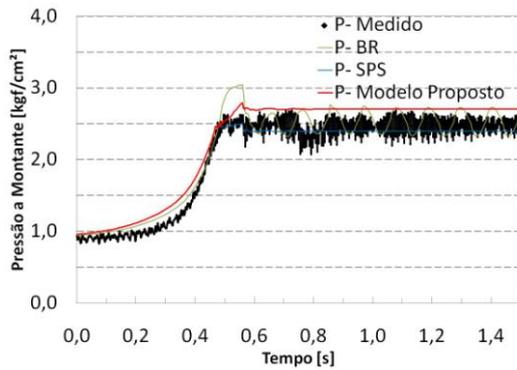
(c) Vazões



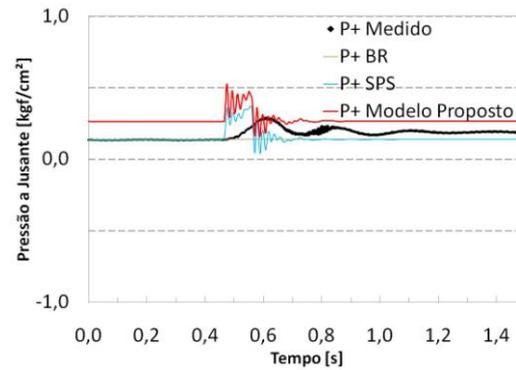
(d) Frações de Abertura

Figura 6.16 – Comportamento das pressões a montante e jusante da válvula de alívio, vazões e frações de abertura para bloqueio em 1,0 s e vazão de alívio de 2,0 m³/h.

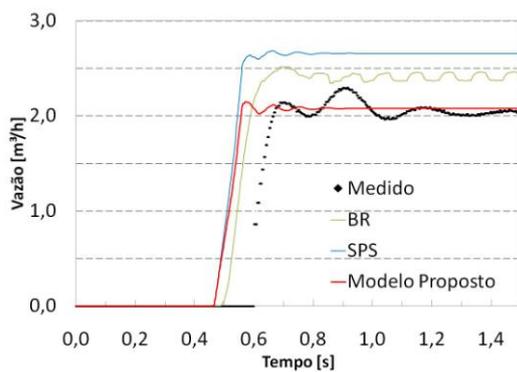
- Bloqueio em 1,5 segundos e vazão de alívio de 2,0 m³/h



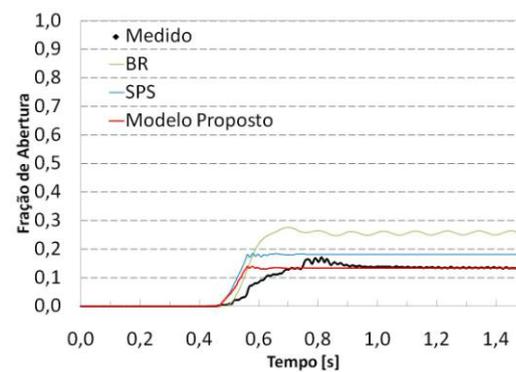
(a) Pressões a Montante



(b) Pressões a Jusante



(c) Vazões



(d) Frações de Abertura

Figura 6.17 – Comportamento das pressões a montante e jusante da válvula de alívio, vazões e frações de abertura para bloqueio em 1,5 s e vazão de alívio de 2,0 m³/h.

Da Figura 6.18 a Figura 6.23 são apresentados os resultados das comparações numérico-experimentais para uma condição transiente mais severa, onde a vazão de alívio foi aumentada para 3,7 m³/h, com a rotação da bomba a 3350 rpm.

Os mesmos comentários apresentados para o caso da vazão de alívio de 2,0 m³/h são válidos para o presente caso. As diferenças entre os valores previstos e medidos para o modelo BR que não leva em conta a informação da

variação do coeficiente de descarga da válvula são ainda mais pronunciadas para a maior vazão. Pode-se notar que o Modelo Proposto apresentou melhor desempenho que o SPS, talvez pelo fato que alguns de seus parâmetros tenham sido calibrados com os valores experimentais da seção de testes construída.

- Bloqueio em 0,2 segundos e vazão de alívio de 3,7 m³/h

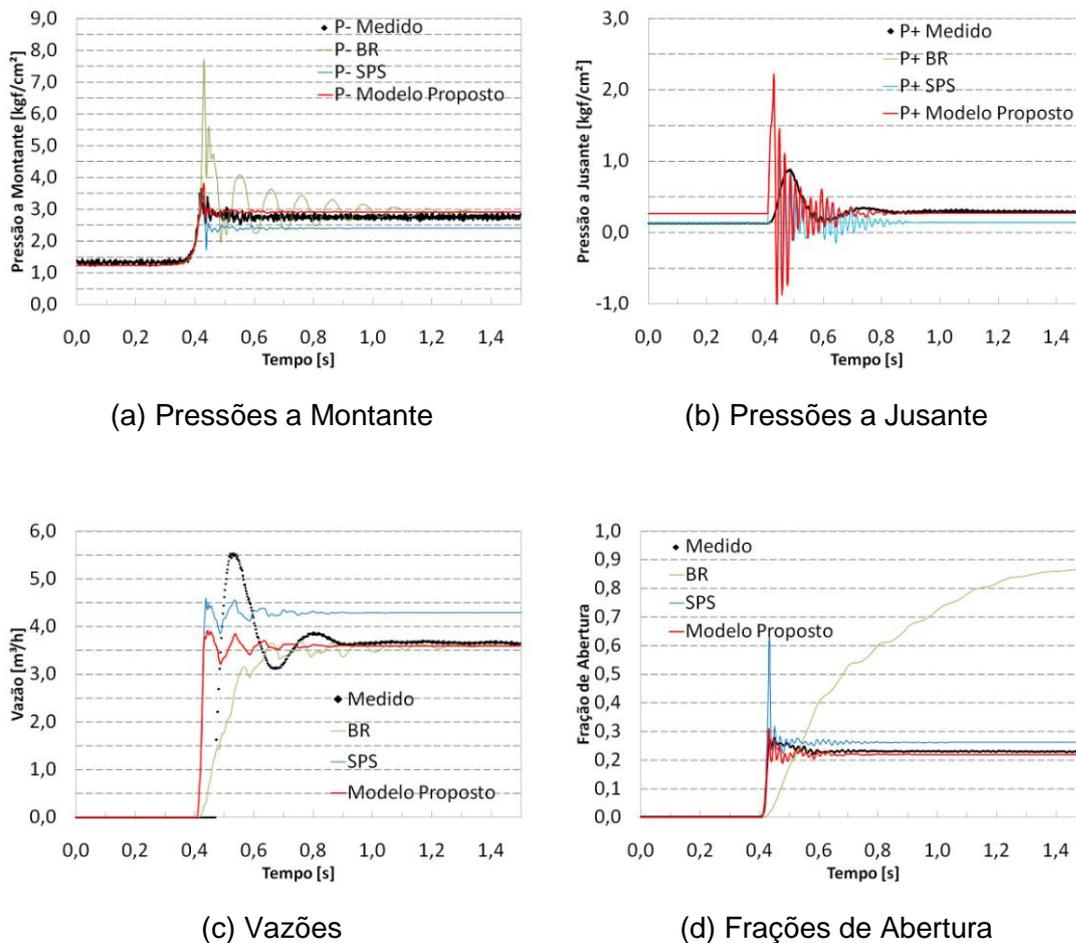
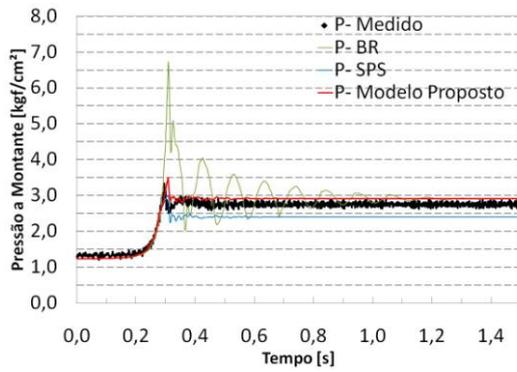
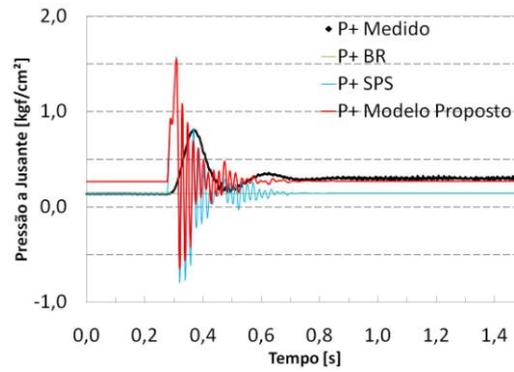


Figura 6.18 – Comportamento das pressões a montante e jusante da válvula de alívio, vazões e frações de abertura para bloqueio em 0,2 s e vazão de alívio de 3,7 m³/h.

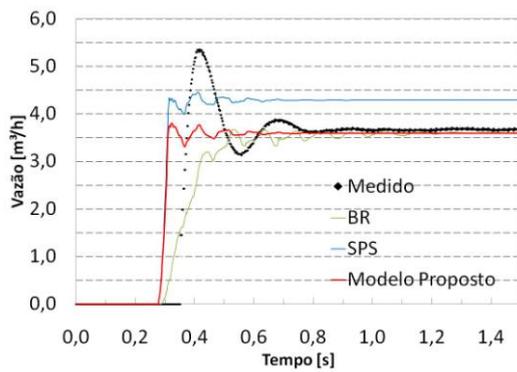
- Bloqueio em 0,3 segundos e vazão de alívio de 3,7 m³/h



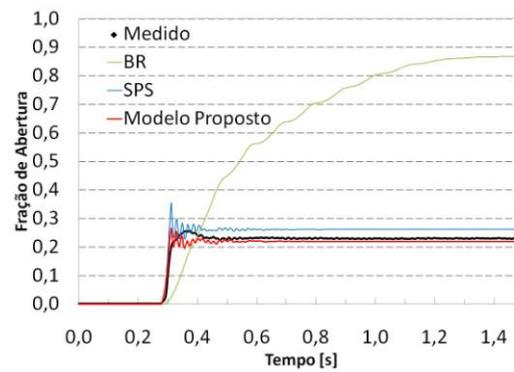
(a) Pressões a Montante



(b) Pressões a Jusante



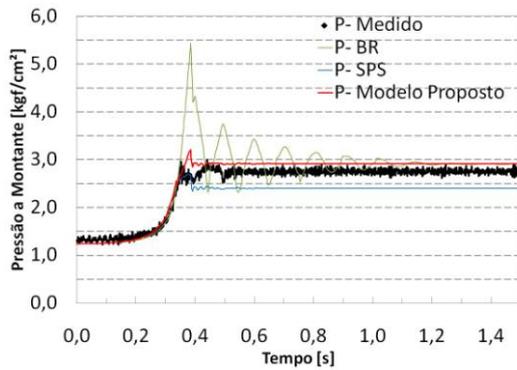
(c) Vazões



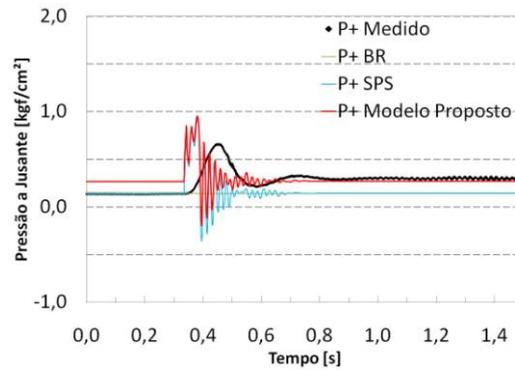
(d) Frações de Abertura

Figura 6.19 – Comportamento das pressões a montante e jusante da válvula de alívio, vazões e frações de abertura para bloqueio em 0,3 s e vazão de alívio de 3,7 m³/h.

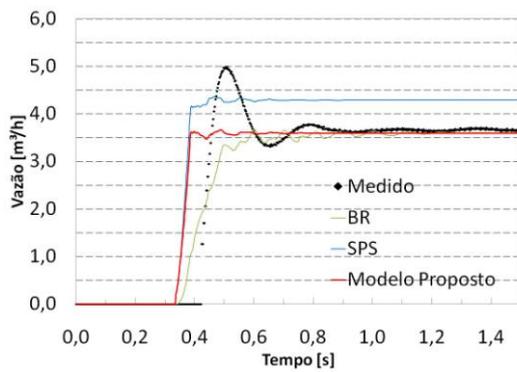
- Bloqueio em 0,5 segundos e vazão de alívio de 3,7 m³/h



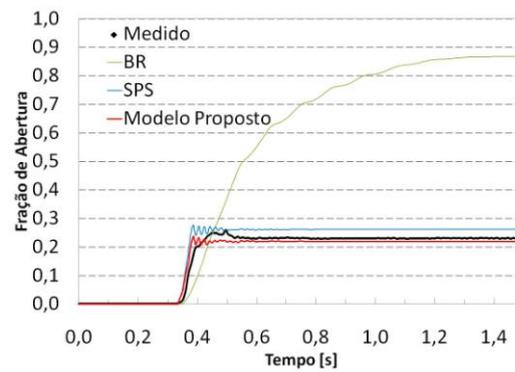
(a) Pressões a Montante



(b) Pressões a Jusante



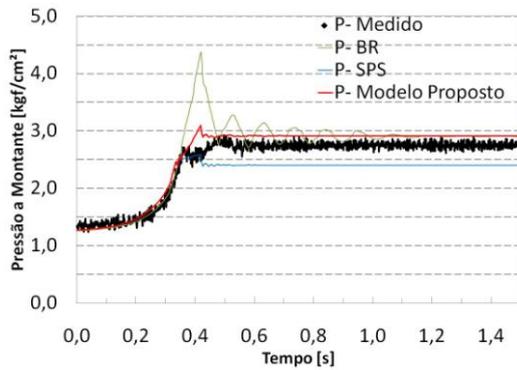
(c) Vazões



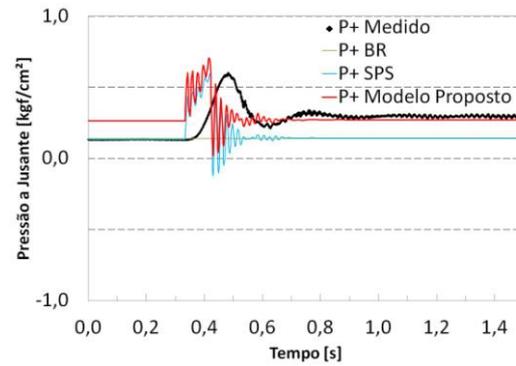
(d) Frações de Abertura

Figura 6.20 – Comportamento das pressões a montante e jusante da válvula de alívio, vazões e frações de abertura para bloqueio em 0,5 s e vazão de alívio de 3,7 m³/h.

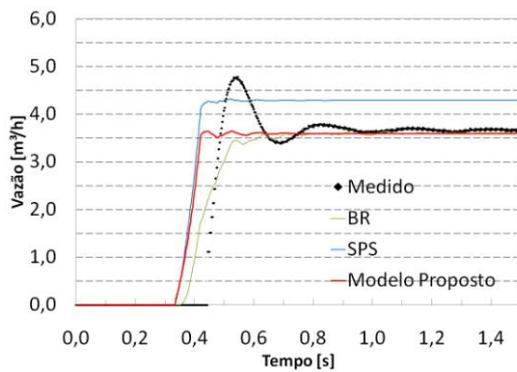
- Bloqueio em 0,8 segundos e vazão de alívio de 3,7 m³/h



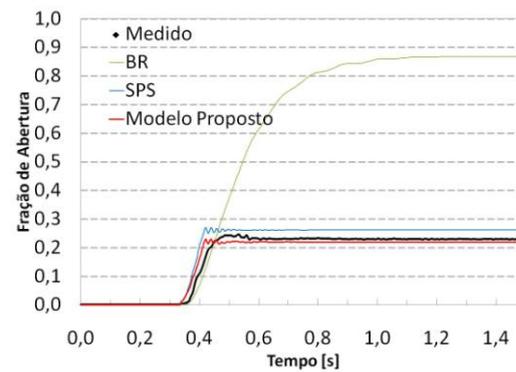
(a) Pressões a Montante



(b) Pressões a Jusante



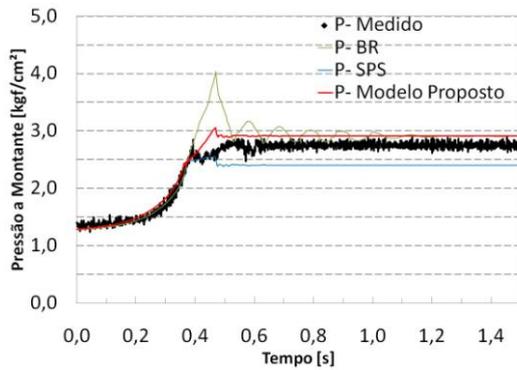
(c) Vazões



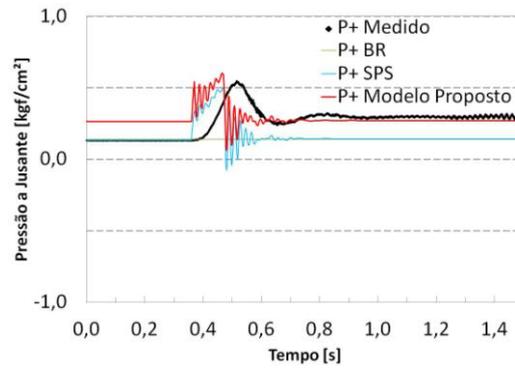
(d) Frações de Abertura

Figura 6.21 – Comportamento das pressões a montante e jusante da válvula de alívio, vazões e frações de abertura para bloqueio em 0,8 s e vazão de alívio de 3,7 m³/h.

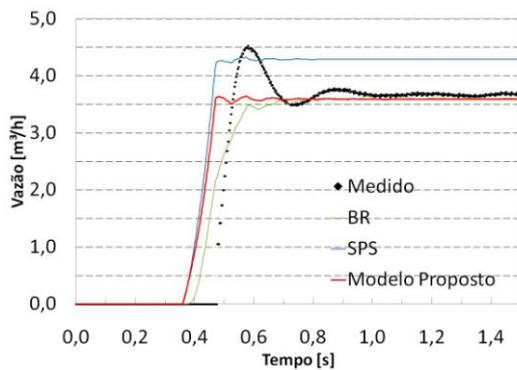
- Bloqueio em 1,0 segundos e vazão de alívio de 3,7 m³/h



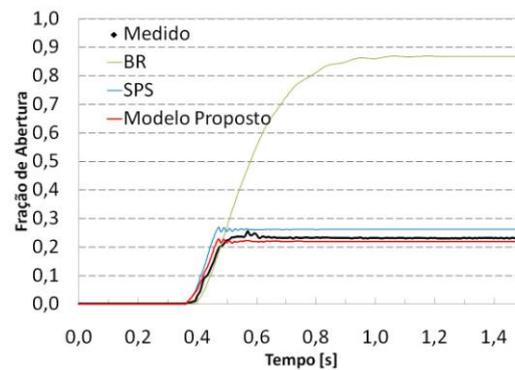
(a) Pressões a Montante



(b) Pressões a Jusante



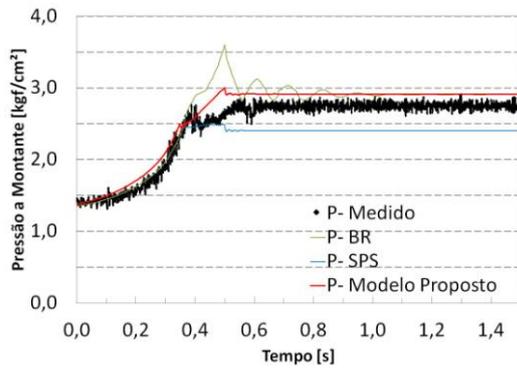
(c) Vazões



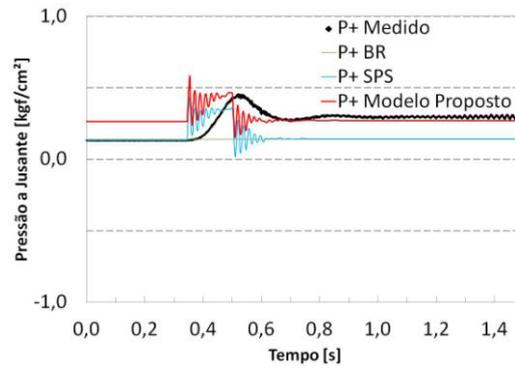
(d) Frações de Abertura

Figura 6.22 – Comportamento das pressões a montante e jusante da válvula de alívio, vazões e frações de abertura para bloqueio em 1,0 s e vazão de alívio de 3,7 m³/h.

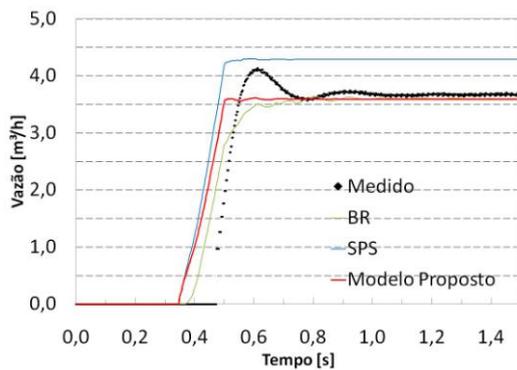
- Bloqueio em 1,5 segundos e vazão de alívio de 3,7 m³/h



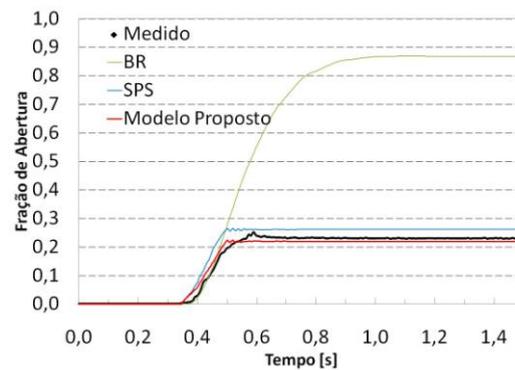
(a) Pressões a Montante



(b) Pressões a Jusante



(c) Vazões



(d) Frações de Abertura

Figura 6.23 – Comportamento das pressões a montante e jusante da válvula de alívio, vazões e frações de abertura para bloqueio em 1,5 s e vazão de alívio de 3,7 m³/h.

6.6.3. Avaliação do Coeficiente de Descarga da Válvula de Alívio em Regime Transiente.

Os dados instantâneos disponíveis para as pressões a montante e a jusante da válvula, vazão e fração de abertura permitem a determinação do valor do coeficiente de descarga instantâneo como função da fração de abertura da válvula. Este valor pode ser comparado ao coeficiente de descarga obtido nos experimentos através de uma sucessão de regimes permanentes onde a válvula era fixada nas diversas posições desejadas. Por limitações do medidor de vazão, o coeficiente de descarga instantâneo foi avaliado apenas para duas condições operacionais correspondentes às rotações da bomba de 2950 e 3350 rpm e um tempo de fechamento da válvula de 1,5 s.

Verificou-se que o medidor de vazão do tipo turbina instalado na descarga da válvula somente fornecia leituras de vazão acima de um valor mínimo igual a $0,7 \text{ m}^3/\text{h}$. Desta forma, a determinação do coeficiente transiente de vazão foi feito para valores acima deste limite, ficando as comparações para valores menores prejudicadas. Além disso, verificou-se que o medidor apresentava um tempo de resposta da ordem de 0,04 s o que produziu um deslocamento da curva de vazão em relação à medição de queda de pressão instantânea e deslocamento instantâneo. O valor deste atraso foi estimado verificando-se nos dados medidos que as leituras de vazão ainda eram nulas mesmo quando se verificava, no mesmo instante de tempo, uma abertura na válvula e a existência de um diferencial de pressão através da válvula.

A Figura 6.24 e a Figura 6.25 apresentam os resultados obtidos para os valores do coeficiente de descarga instantâneo para as duas condições estudadas. Em cada figura são apresentadas duas curvas correspondendo aos valores do coeficiente de descarga calculados a partir dos dados instantâneos de pressão, vazão e abertura com e sem a correção do atraso do medidor de vazão comentado anteriormente. Também em cada figura, é apresentada uma curva representando a variação do coeficiente de descarga da válvula determinado a partir de uma sucessão de regimes permanentes.

A análise das figuras mostra que após a correção do atraso na leitura do medidor de vazão, existe uma notável coincidência entre valores do coeficiente

de descarga instantâneo e aquele calculado em regime permanente. Esta informação é de grande valia, pois valida o procedimento significativamente mais simples de determinar o coeficiente de descarga a partir de uma sucessão de valores de abertura em regime permanente. Para trabalhos futuros, sugere-se que medidores de vazão com tempo de resposta menores sejam utilizados para validar estas conclusões para as menores faixas de vazão produzidas nos estágios iniciais da abertura da válvula e também para condições mais severas em transientes de bloqueio mais rápidos.

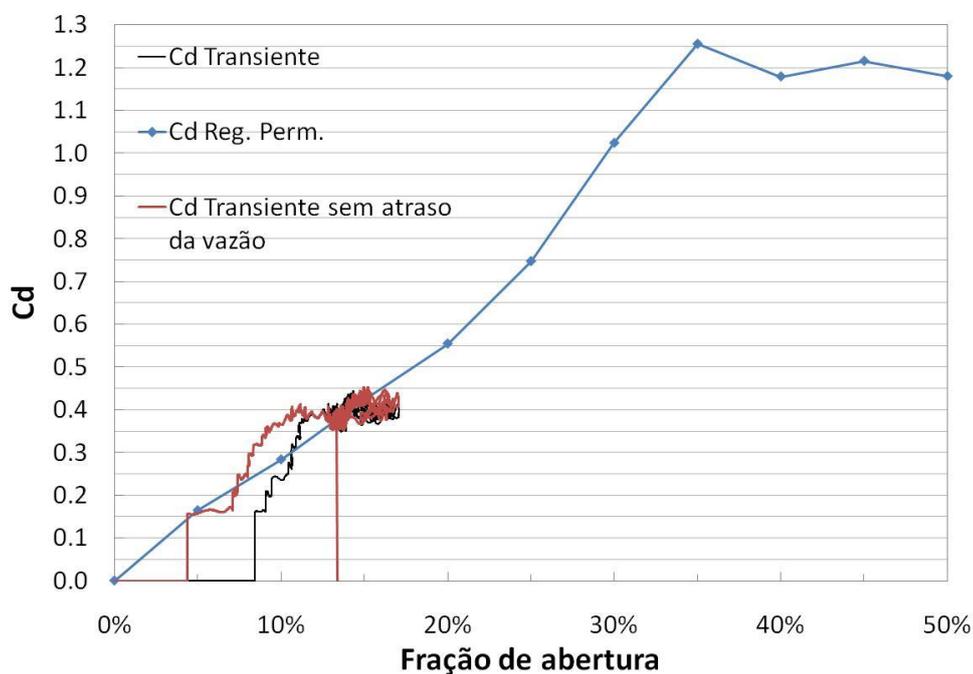


Figura 6.24 – Comparação entre coeficientes de descarga determinados em regime permanente e em regime transiente para rotação da bomba de 2950 rpm e tempo de bloqueio de 1,5 s.

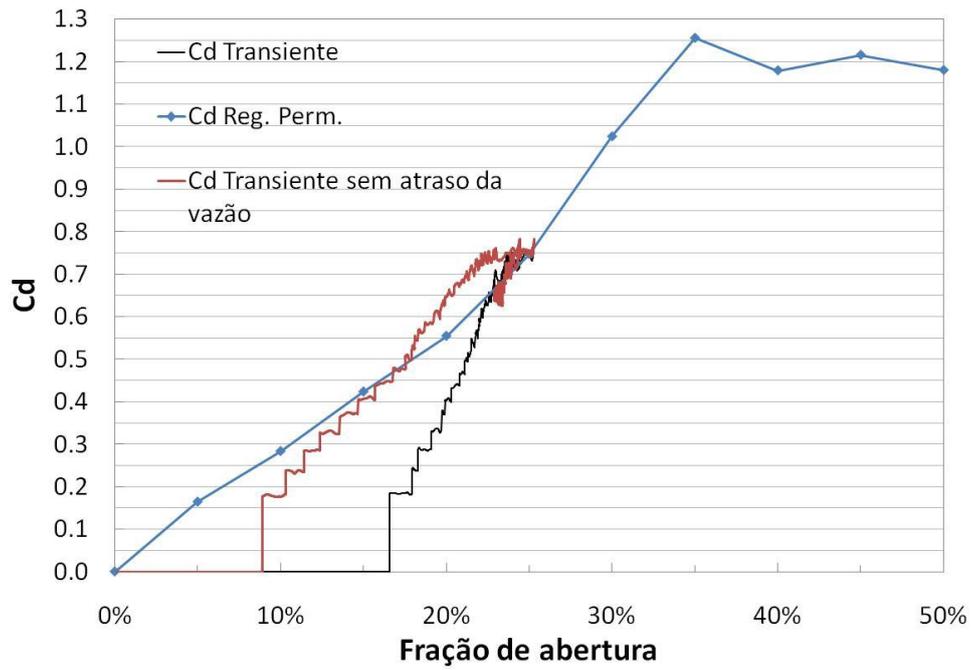


Figura 6.25 – Comparação entre coeficientes de descarga determinados em regime permanente e em regime transiente para rotação da bomba de 3350 rpm e tempo de bloqueio de 1,5 s.