XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

ESTUDO DO COEFICIENTE DE PERDA DE CARGA EM UM DISPOSITIVO HIDRÁULICO TIPO VENTURI - MÁQUINA DE CAVITAÇÃO

Aline Vivier [1]; João Pedro Paludo Bocchi [2]; Renato Steinke Junior [3]; Priscila Maria Kipper [4]; Cassiano Korndoerfer Torni [5]; Sieg Calsing Spalding Duarte [6]; Daniela Guzzon Sanagiotto [7]; Luiz Augusto Magalhães Endres [8]; Eder Daniel Teixeira [9]; Mauricio Dai Prá [10]

Abstract: Cavitation is a phenomenon that occurs in hydraulic structures and is important to evaluate. In fact, it can alter the safety of the structures which are subjected to flows that promote the formation of this phenomenon, like the security devices of dams. In order to study this phenomenon in laboratory, a cavitation machine (Venturi type device) has been implemented at LOH (Laboratório de Obras Hidráulicas - UFRGS). However, during the tests a pressure drop can be observed in addition to the cavitation phenomenon. In fact, that's characteristic behaviour of the fluid when there are pipes with significant geometrical changes. The machine used in our experimentations is one of them. It is made of changes in the shape of sections, from circular to rectangular, and have a convergence followed by a divergence. The present study aims to compare the pressure drop values measured during the simulations with some values from the literature. These values are included in the range of values measured (between 0,15 and 0,65), but we can observe differences in behaviour in relation to the Reynolds number due to the onset of the cavitation phenomenon or the characteristics of the devices in the literature which are not identical to our case.

Resumo: A cavitação é um fenômeno que pode ocorrer em estruturas hidráulicas. Por isso é de importância sua avaliação, porque ela pode danificar estruturas que estejam submetidas a escoamentos que propiciem a formação deste fenômeno, tais como os dispositivos de segurança das obras. Para permitir seu estudo em laboratório, uma máquina de cavitação (dispositivo tipo Venturi) foi implementado no LOH (Laboratório das Obras Hidráulicas – UFRGS). No entanto, além do fenômeno de cavitação, observa-se uma acentuada perda de carga localizada. De fato, isso é intrínseco ao comportamento do fluido quando escoa por tubulações que apresentam variações importantes de geometria. No caso do arranjo hidráulico do experimento, incluindo a máquina de cavitação, da maneira como foi concebida, existem variações de forma de seções, circular para retangular, e seguido de um estreitamento e um alargamento e uma nova transição retangular para circular. O presente estudo objetiva avaliar as perdas de carga medidas na máquina de cavitação com valores calculados através de dados presentes em bibliografia. Esses valores estão incluídos na faixa de valores medidos (entre 0,15 e 0,65), mas são observadas diferenças de comportamento em função do número de

[1]1) Graduanda em Engenharia em Ciências e Tecnologias da Água (Polytech Montpellier); aline.vivier@etu.umontpellier.fr
2) Doutorando em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental (IPH/UFRGS); jp.bocchi@gmail.com
3) Doutor em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental (IPH/UFRGS); renato.steinkejunior@gmail.com
4) Mestranda em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental (IPH/UFRGS); priscila_kipper@hotmail.com
5) Graduando em Engenharia Hídrica (IPH/UFRGS); cassianoktornin@outlook.com
6) Graduando em Engenharia de Energia (UFRGS): siegcall@hotmail.com
7) Professora Doutora DHH/IPH/UFRGS: dsanagiotto@ufrgs.br
8) Professor Doutor DHH/IPH/UFRGS: endres@ufrgs.br
9) Professor Doutor DOH/IPH/UFRGS: eder.teixeira@ufrgs.br
10) Professor Doutor DOH/IPH/UFRGS: mauricio.daipra@ufrgs.br

Reynolds, devido ao início do fenômeno de cavitação (que ocorre com o aumento da vazão) ou às características dos dispositivos da literatura, que não são exatamente idênticos ao caso analisado.

Palavras-Chave – Perda de carga, Venturi, Cavitação.

INTRODUÇÃO

O estudo dos efeitos da cavitação sobre superfícies de concreto é um grande desafio para as estruturas hidráulicas. De fato, esse material é usado nos vertedouros e dissipadores de energia, responsáveis pela segurança das barragens. Essas estruturas são sujeitas a muitos esforços hidrodinâmicos, bem como efeitos abrasivos e efeitos de cavitação, que podem gerar danos cumulativos e irreversíveis.

Para avaliar esses danos, Abreu (2024) desenvolveu um trabalho experimental para compreender os critérios técnicos utilizados como indicativo do risco de ocorrência de cavitação em estruturas hidráulicas de concreto, tais como índices de cavitação (σ), pressões médias e os parâmetros característicos do concreto. Os testes foram realizados através da utilização de um dispositivo tipo Venturi (aqui denominado como "máquina de cavitação") presente na instalação experimental do Laboratório de Obras Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (LOH/UFRGS).

As medidas de pressões realizadas nessa pesquisa são impactadas pelas perdas de carga que ocorrem na máquina de cavitação, dadas as características geométricas deste dispositivo (composto por uma transição de tubulação circular para retangular, um estreitamento seguido de alargamento e, por fim, uma transição de geometria retangular para seção circular). Essas características geométricas proporcionam perdas de cargas singulares (localizadas) ao escoamento.

Segundo Fox, McDonald e Pritchard (2010), a perda de carga é a dissipação de energia que um escoamento sofre no trajeto de todo o sistema. Essas perdas de cargas podem ser distribuídas (efeitos viscosos) ou localizadas (perturbações bruscas no escoamento, como válvulas, mudança de direção, alargamento, obstruções etc.).

Os primeiros pesquisadores que desenvolveram uma equação consistente para descrever a perda de carga foram Henry Darcy e Julius Weisbach. Essa equação que foi proposta em 1845 denominada Darcy-Weisbach, também conhecida como equação universal da perda de carga (equação 1):

$$h_f = f.\frac{L}{D}.\frac{V^2}{2g} \quad (1)$$

Sendo: h_f a perda de carga ao longo do comprimento do tubo (mca), f o fator de atrito (adimensional), L o comprimento do tubo (m), v a velocidade média do escoamento no interior do tubo (m/s), D o diâmetro interno do tubo (m), g aceleração da gravidade local (m/s^2).

A perda de carga localizada ocorre devido à elevação da turbulência causada por peças especiais e conexões da canalização. Essa elevação da turbulência provoca atritos que causam o choque de partículas que são a origem da perda de carga. (Azevedo Netto, 1954).

Para as perdas de carga localizadas, uma das metodologias mais consolidadas (equação 2) é a utilização de um coeficiente k, que depende das características da singularidade (tipo de peça, diâmetro, geometria e rugosidade) e pode variar também em função do número de Reynolds do escoamento.

$$\Delta H_{loc} = k.\frac{V^2}{2g} \quad (2)$$

Sendo: ΔH_{loc} a perda de carga localizada e k o coeficiente de perdas de cargas localizadas.

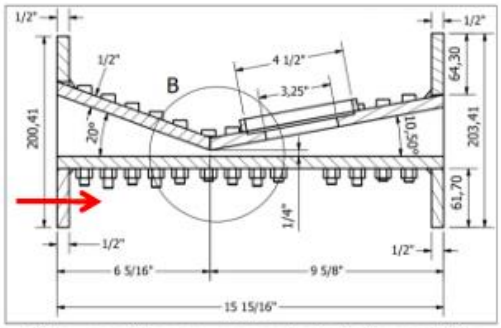
O objetivo deste trabalho foi avaliar o coeficiente de perda de carga localizada (k) da máquina de cavitação e comparar os valores obtidos nos ensaios experimentais com os valores encontrados na literatura.

METODOLOGIA

Materiais: Máquina de cavitação

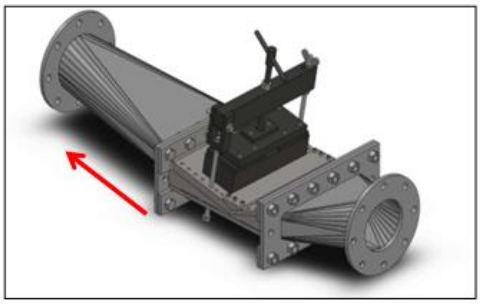
O dispositivo de cavitação (Figura 1) utilizado neste estudo consiste em um estreitamento progressivo com um ângulo de 20° até uma seção contraída. Esta seção contraída possui 6,75 mm de altura e 311,5 mm de largura. Essa seção é seguida por uma ampliação com um ângulo de 10,5° de modo a se reconectar com a tubulação de 150mm de diâmetro. As dimensões são explicadas em mais detalhes na Tabela 1.

Figura 1 – Desenho esquemático com as dimensões características da máquina de cavitação (a); imagem renderizada do dispositivo (b), e; imagem do dispositivo construído e instalado no LOH/UFRGS (c). A flecha indica o sentido do escoamento.



Obs.: medidas em mm, salvo indição contrária.

(a)



(b)



(c)

Tendo em vista que as tubulações são retangulares, para caracterizar o diâmetro da tubulação será usado o diâmetro hidráulico, que se expressa na forma da equação 3:

$$D_h = \frac{4*A}{P} = \frac{2*B*h}{B+h} \quad (3)$$

Sendo: A a área da seção transversal, P o perímetro molhado, B a largura e h a altura.

Tabela 1 – Dimensões da máquina de cavitação

Dimensões da máquina de cavitação (LOH/UFRGS)			
	Montante	Seção contraída	Jusante
Ângulo (°)	20	-	10,5
Largura (mm)	311,5	311,5	311,5
Altura (mm)	65	6,75	50
Área da seção (mm^2)	20247,5	1168,125	15575
Diâmetro hidráulico (mm)	107,56	7,41	86,17

Medidas das perdas de cargas

A perda de carga foi medida através dos diferenciais de pressões obtidos a partir de manômetros, localizados a montante e a jusante de dispositivo de cavitação, na tubulação com 150mm de diâmetro. Foram realizados ensaios com 16 diferentes vazões no sistema, variando de 13,7 L/s a 65,1 L/s.

Partindo da Equação da energia (equação 4) e aplicando-a em duas seções transversais subsequentes (sendo 1 a seção de montante e 2 a seção de jusante), considerando ainda o fluido como incompressível, altitude Z e dimensões das seções transversais idênticas nas duas seções resulta na equação 5 que representa a perda de carga (ΔH):

$$H = \frac{p}{\rho g} + z + \frac{V^2}{2g} \quad (4)$$

$$\Delta H = \frac{p_1 - p_2}{\rho g} \quad (5)$$

Para caracterizar a perda de carga foi calculado o coeficiente adimensional k conforme equação 2. Para analisar a correlação entre esse coeficiente e o número de Reynolds (equação 6) ele foi calculado para cada vazão ensaiada, tendo por base as dimensões da seção contraída da máquina de cavitação.

$$\Re = \frac{V.D_H.\rho}{\mu} \quad (6)$$

Sendo: V a velocidade média do escoamento (m/s); D_H o diâmetro hidráulico (m); ρ a massa específica do fluido (kg/m^3); e μ a viscosidade dinâmica do fluido (kg/ (m.s)).

Equações de perdas de cargas

Para ter uma visão geral das perdas de cargas singulares na bibliografia, e para as comparações, buscou-se identificar equações que pudessem ter alguma semelhança geométrica com a máquina de cavitação que foi estudada. Como a geometria exata do dispositivo de cavitação não existe na literatura, foram consideradas equações de perda de carga de geometrias aproximadas de componentes contidos na máquina de cavitação, tal como equações de ampliação, redução, difusor e transição de tubulações circular a retangular.

- *Ampliação e redução*

Azevedo Netto (1954) elabora uma lista dos valores de perdas localizadas para algumas singularidades comuns nas infraestruturas hidráulicas, como controladores de vazão, curvas, tês, dentre outras. Duas das singularidades se assemelham ao caso da máquina de cavitação: a ampliação gradual e a redução gradual, para as quais os valores de coeficiente de perda de carga são 0,30 e 0,15, respectivamente (Tabela 2).

- *Medidor Venturi*

Lahiouel e Lahiouel (2015) conduziram experimentos em uma bancada de testes hidráulicos para determinação de perdas de carga em singularidades. Ela é constituída de uma rede de condutos forçados com diferentes peças, conforme Tabela 3. Cada peça tem um piezômetro a montante e um a jusante para medir as pressões e consequentemente a perda de carga localizada a partir dos diferenciais de pressões. Dentre as peças quantificadas pelos autores, o medidor Venturi (Figura 2) é o que guarda maior semelhança com a máquina de cavitação em análise. Os valores de perda de carga obtido por Lahiouel e Lahiouel (2015) podem ser observados na Tabela 3.

Figura 2 – Medidor Venturi

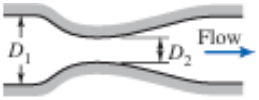


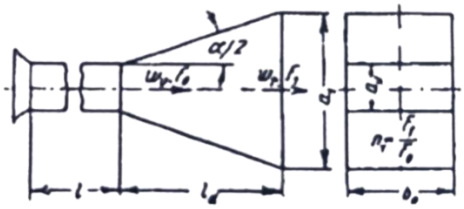
Tabela 2 – Perdas de cargas para singularidades - adaptado deLahiouel e Lahiouel (2015)

	Ampliação Brusca	**Contração Brusca**	**Curva Brusca (90°)**	**Curva Progressiva (45°)**	**Venturi**
Resultados Experimentais	0,21	0,39	0,70	0,197	0,61

- *Difusor plano*

Idel'chik (2007) apresenta uma equação para determinar as perdas localizadas nos diferentes tipos de peças que podem ser encontradas nas canalizações. Uma das peças que possui alguma semelhança com a máquina de cavitação é o difusor plano (Figura 3). De fato, ele apresenta uma geometria retangular se diferenciando da maioria das equações que caracterizam tubulações circulares (o que não corresponde ao caso em análise).

Figura 3 – Difusor plano



Considerando o campo de velocidade uniforme na entrada do difusor, Idel'chik (2007) apresenta as equações 7, 8, 9 e 10 que permitem calcular a perda de carga em difusores com ângulos de até 40°.

$$K=K_{élarg}+K_f \quad (7)$$

$$K_{élarg} = \varphi_{élarg}\left(1-\frac{F_0}{F_1}\right)^2 \quad (8)$$

$$\varphi_{élarg} \simeq 3{,}2tan\frac{\alpha}{2}\sqrt[4]{tan\frac{\alpha}{2}} \quad (9)$$

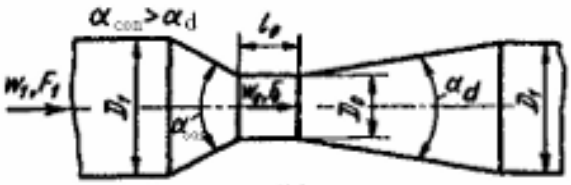
$$K_f \simeq \frac{\lambda}{4sin\frac{\alpha}{2}}\left[\frac{a_0}{b_0}\left(1-\frac{F_0}{F_1}\right)+0{,}5\left[1-\left(\frac{F_0}{F_1}\right)^2\right]\right] \quad (10)$$

$$\lambda = \frac{1}{(1{,}8log\ Re-1{,}64)^2} \quad (11)$$

- *Peça convergente-divergente*

Uma outra peça que será considerada é a uma transição convergente-divergente, apresentada por Idel'chik (2007) para seções retangulares (Figura 4), cuja perda de carga pode ser calculada pela equação 12. Ela será considerada isolada e posteriormente serão acrescentadas as perdas de cargas das transições das tubulações circular para retangular (a montante) e retangular para circular (a jusante).

Figura 4 – Peça convergente-divergente



$$K = k_1 k_2 \xi_1 + \Delta\xi \quad (12)$$

Considerando a razão das áreas das seções serão extraídos os valores de k_1, ξ_1 e $\Delta\xi$ respectivamente das Tabelas 4, 5 e 6. O k_2 será calculado sendo a equação 13.

$$k_2 = 0{,}66 + 0{,}35\, l_0/D_0 \quad (13)$$

Tabela 3 – Valores de k_1

F_1/F_0	D_1/D_0	α_d				
		5°	7°	10°	12,5°	15°
1,5–1,6	≃1,25	0,59	0,55	0,48	0,4	0,33
2,2–2,3	≃1,50	0,81	0,81	0,78	0,77	0,66
3,0–3,2	≃1,75	0,9	0,89	0,85	0,81	0,77
≥4,0	≥2,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0

Tabela 4 – Valores de ξ_1 para $l_O/D_O=0$

Re × 10^{-5}	α											
	4°	6°	8°	10°	14°	20°	30°	45°	60°	90°	120°	180°
N_{ar1} = 2												
0,5	0,2	0,165	0,142	0,135	0,125	0,154	0,235	0,35	0,37	0,38	0,37	0,35
1	0,18	0,145	0,125	0,115	0,105	0,12	0,2	0,335	0,37	0,38	0,37	0,35
2	0,163	0,125	0,11	0,1	0,093	0,115	0,2	0,335	0,37	0,38	0,37	0,35
>=4	0,15	0,115	0,1	0,096	0,083	0,115	0,2	0,335	0,37	0,38	0,37	0,35
N_{ar1} = 4												
0,5	0,275	0,225	0,285	0,17	0,182	0,25	0,42	0,6	0,68	0,7	0,7	0,66
1	0,23	0,182	0,16	0,14	0,128	0,25	0,42	0,6	0,68	0,7	0,7	0,66
>=4	0,165	0,15	0,133	0,135	0,162	0,25	0,42	0,6	0,68	0,7	0,7	0,66
N_{ar1} = 6												
0,5	0,31	0,25	0,215	0,21	0,3	0,48	0,65	0,76	0,83	0,83	0,83	0,8
1	0,25	0,205	0,175	0,17	0,3	0,48	0,65	0,76	0,83	0,83	0,83	0,8
2	0,235	0,19	0,17	0,15	0,29	0,48	0,65	0,76	0,83	0,83	0,83	0,8
>=6	0,2	0,15	0,14	0,13	0,19	0,48	0,65	0,76	0,83	0,83	0,83	0,8

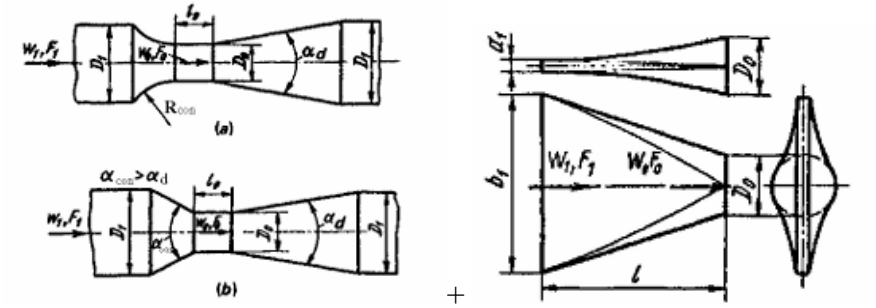
Tabela 5 – Valores de Δξ

F_1/F_0	D_1/D_0	l_0/D_0					
		0,25	0,5	0,75	1	1,25	1,5
1,5–1,6	≅1,25	-0,012	-0,008	-0,004	0	0,004	0,008
2,2–2,3	≅1,50	-0,020	-0,014	0	0	0,010	0,014
3,0–3,2	≅1,75	-0,022	-0,016	-0,010	0	0,010	0,014
≥4,0	≥2,0	-0,028	-0,020	-0,010	0	0,010	0,016
F_1/F_0	D_1/D_0	l_0/D_0					
		1,75	2	2,5	3	3,5	4
1,5–1,6	≅1,25	0,012	0,016	-	-	-	-
2,2–2,3	≅1,50	0,020	0,022	0,038	0,048	0,060	0,072
3,0–3,2	≅1,75	0,022	0,027	0,038	0,050	0,062	0,073
≥4,0	≥2,0	0,028	0,030	-	-	-	-

- *Convergente +divergente +transições*

Como mencionado anteriormente, sobre os resultados de perda de carga da peça convergente-divergente, serão acrescentadas as perdas de cargas das transições de tubulações de alteração da forma da seção das tubulações, circular a retangular a montante e o contrário a jusante. Idel'chik (2007) apresenta a Figura 5 que ilustra essa transição.

Figura 5 – Configuração peça convergente-divergente mais transições circular-retangular



Para o uso desta abordagem, é necessário relembrar que a configuração da máquina de cavitação é composta por uma peça convergente circular para retangular (equação 14), seguido de um estreitamento e alargamento, sendo descrito como uma peça convergente-divergente (equação 12) e por fim, há uma transição divergente de retangular para circular (equação 15).

$$\xi_{con} = \xi_{sim} + 0{,}3exp\,(-Re.10^{-5}) \quad (14)$$

$$\xi_{div} = \xi_{sim} + 0{,}5exp\,(-Re.10^{-5}) \quad (15)$$

Onde, para determinação dos coeficientes, são utilizadas as equações 16, 17, 18 e 19 e valores extraídos da Tabela 7.

$$\xi_{sim} = (c_0 + c_1 \frac{b_1}{a_1})(\frac{F_0}{F_1})^2 \quad (16)$$

$$c_0 = \lambda(l/D_h) \quad (17)$$

$$D_h = [2a_1b_1/(a_1 + b_1) + 0{,}5D_0] \quad (18)$$

$$\lambda = \frac{1}{(1{,}8logRe - 1{,}64)^2} \quad (19)$$

Tabela 6 – Valores de c_1 divergente e convergente

l/D_0	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	4,0	5,0
c_{1d}	0,055	0,03	0,023	0,018	0,015	0,008	0,006
c_{1con}	0,002	0,002	0,002	0,002	0,0015	0,001	0

RESULTADOS

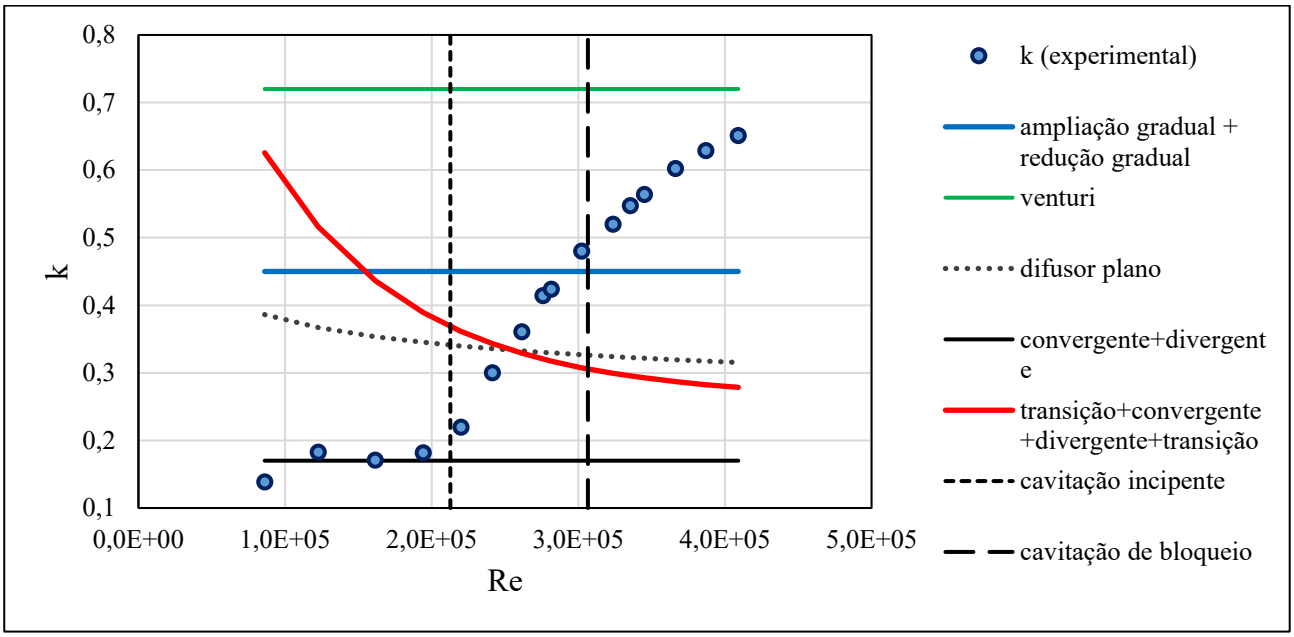
Quando as equações apresentadas anteriormente são aplicadas às condições geométricas da máquina de cavitação em estudo, as perdas de cargas obtidas resultam nos valores apresentados na Tabela 8. Pode-se observar uma ordem de grandeza similar às perdas de cargas medidas nos experimentos.

Tabela 7 - Valores de perdas de carga calculadas

Ampliação e redução	Venturi	Difusor plano	Convergente e divergente	Convergente e divergente com as transições	Experimental
0,45	0,72	K=f(Re) [0,39;0,32]	0,17	K=f(Re) [0,63;0,28]	K=f(Re) [0,14;0,65]

Na Figura 6, pode-se observar um comportamento constante do coeficiente de perda de carga para Re < $2{,}13.10^5$, com uma magnitude na ordem de 0,17. De fato, isso corresponde a faixa de Re anterior ao início do processo de cavitação (cavitação incipiente), ou seja, os escoamentos que não têm potencial de geração de danos perceptíveis às superfícies, porque é apenas o início das formações das cavidades de vapor. Depois disso, o comportamento do coeficiente de perda de carga localizada apresenta alteração e cresce com relação ao aumento do Número de Reynolds (Re).

Figura 6 – Perdas de carga na máquina de cavitação



Ainda de acordo com a Figura 6, na comparação dos resultados experimentais deste estudo com os valores da literatura, observa-se que para a ampliação gradual seguida da redução gradual o valor calculado pertence à faixa de perda de carga observada. No entanto, esses valores não dependem de Re, então, não podem descrever com precisão o fenômeno que ocorre na máquina de cavitação quando o escoamento atinge padrões de pressão que indicam o início do fenômeno de cavitação. O mesmo se pode afirmar para o caso da peça convergente e divergente, que tem uma perda de carga na ordem dos valores obtidos nos experimentos para os Reynolds antes do início do fenômeno de cavitação.

Para o valor da perda de carga do medidor Venturi, a diferença pode ser explicada pelas diferenças geométricas com relação à máquina de cavitação. Apesar disso, se poderia esperar um valor no intervalo já que a máquina de cavitação, apesar da restrição da tubulação similar o medidor Venturi, compõe transições a montante e a jusante de mudança de tubulações circular para retangular.

Por outro lado, a peça de alargamento da máquina de cavitação é muito progressiva, então, suas perdas de cargas localizadas são reduzidas. Isso pode não ser o caso do canal Venturi visualizado em literatura. No difusor plano se observa um comportamento decrescente das perdas de cargas. Isso pode ser explicado pelo fato da ocorrência da cavitação no dispositivo ensaiado, que não ocorre no difusor, onde o aumento do Número de Reynolds só implica na diminuição do fator de atrito.

CONCLUSÕES

Com base nas dimensões da máquina de cavitação, é possível estimar a perda de carga que ocorre durante as simulações para diferentes vazões. De fato, comparando os valores medidos com valores observados em literatura, nota-se certa semelhança para algumas geometrias análogas. No entanto, as perdas de cargas na máquina de cavitação são difíceis de comparar com os valores da literatura, muito por causa da geometria específica do dispositivo em estudo e do fenômeno de cavitação, que altera o comportamento e as características do fluido e do escoamento. Nota-se também uma variação do comportamento do coeficiente de perda de carga a partir da ocorrência de cavitação no sistema, o qual apresenta um comportamento variável com relação ao número de Reynolds.

Acrescenta-se ainda o fato de que todas as equações para determinação dos fatores k de perda de carga localizadas são desenvolvidos para escoamentos não compressíveis e principalmente sem quebra da veia líquida. A cavitação que ocorre para Números de Reynolds maiores do que $2{,}13.10^5$, faz com que qualquer comparação com coeficiente determinados através da bibliografia deva ser observada com muito cuidado.

REFERÊNCIAS

ABREU, A. S. (2024) "*Estudo da Ocorrência de Danos em Superfícies de Concreto através do Fenômeno da Cavitação"* Tese de doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental - UFRGS-IPH https://lume.ufrgs.br/handle/10183/279164

FOX, MCDONALD E PRITCHARD (2010) *Introduction to Fluid Mechanics, 8th edition* *http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM240/Marchi/Bibliografia/Pritchard-Fox-McDonalds_2011_8ed_Fluid-Mechanics.pdf*

DE AZEVEDO NETTO, J.M. (1954) "*Perdas de carga localizadas, em canalizações"* Boletim do Departamento de águas e esgotos São Paulo- Edição n°25 https://revistadae.com.br/artigos/artigo_edicao_25_n_1000.pdf

YASMINA LAHIOUEL, RACHID LAHIOUEL (2015) "*Evaluation of energy losses in pipes*." 22º Congresso Francês de Mecânica, Lyon, France. https://hal.science/hal-03446141/document

IDEL'CHIK, I. E. (2007) *Handbook of Hydraulic Resistance* 4th Edition Revised and Augmented Series Editors Begell House, Inc.

AGRADECIMENTOS

A todas as pessoas envolvidas na parceria entre a Polytech Montpellier e a UFRGS, que proporcionaram a oportunidade para a autora principal deste artigo realizar estágio no Brasil. Agradecimentos a Foz do Chapecó Energia, a Eletrobras e à CAPES/Brasil pelo apoio financeiro ao projeto que deu origem a este trabalho.