

UTILIZAÇÃO DO SOFTWARE TRACKER PARA DETERMINAÇÃO DOS COEFICIENTES DE VELOCIDADE, DESCARGA E CONTRAÇÃO NO EXPERIMENTO DO ALCANCE DO JATO DE ÁGUA

Sharon Dantas da Cunha¹
George Daniel Vieira Galdino²
Kytéria Sabina Lopes de Figueredo³

RESUMO

A velocidade de saída do fluido em um recipiente/tanque aberto com um orifício lateral pode ser determinada através da equação de Torricelli. Esta é uma situação idealizada, e experimentalmente o valor medido é distinto. Uma garrafa PET de 2 litros com um orifício circular na lateral foi utilizado no experimento do alcance do jato de água, no qual um celular foi utilizado para filmar o experimento. As imagens capturadas no filme foram analisadas no software livre Tracker versão 5.1.5 e a partir desta análise foram obtidas as coordenadas do alcance do jato de água, a altura do líquido em relação ao orifício circular, e a altura do plano de medida do alcance até o orifício. Os dados gerados foram utilizados para determinar os coeficientes de velocidade, descarga e contração do orifício circular. Os valores dos coeficientes obtidos nesse estudo são compatíveis com os registrados na literatura, e confirmam que o software Tracker pode ser utilizado para determinação dos coeficientes de velocidade, contração e descarga utilizando um experimento com materiais de baixo custo.

Palavras-chave: Orifício Circular, Equação de Torricelli, Materiais de Baixo Custo, Ensino de Física

INTRODUÇÃO

Alguns processos físicos podem ser expressos por equações matemática, e a física foi resultado de observações de vários filósofos, dentre os quais pode-se citar Galileu que estudou o movimento dos projéteis, e concluiu que uma pedra, ou até mesmo uma bala de canhão, movimentam-se ao longo de duas dimensões numa trajetória parabólica. Depois, Torricelli comprovou essas descobertas, e aplicou para escoamentos de água através de um orifício lateral em grandes recipientes.

Uma situação do cotidiano para ilustrar essa situação é o esvaziamento de uma caixa d'água através de um cano lateral, onde se observa que o jato de água fica mais distante (maior alcance), quando a caixa está cheia, e diminui à medida que a caixa está sendo

¹ Professor Doutor, Universidade Federal Rural do Semi-Árido - UFERSA. sharondantas@ufersa.edu.br;

² Graduando do Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, Universidade Federal Rural do Semi-Árido - UFERSA, georgedaniel1551@gmail.com ;

(83) 3322.3222³ Professora Doutora, Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA, kyteria.figueredo@ufersa.edu.br;

esvaziada. Teoricamente, a velocidade de saída do orifício é explicada através da equação de Bernoulli usando o modelo de um tanque cheio com um orifício na lateral, cuja velocidade do fluido sai pelo orifício é dada pela equação do Torricelli, ou seja, proporcional à raiz quadrada da altura do líquido do reservatório

Porém, esta equação é obtida para uma situação idealizada e o fluido utilizado é denominado fluido ideal (HALLIDAY, 2016; NUSSENZVEIG, 2014). Na prática se observa que essa velocidade é um pouco menor que a previsão teórica (AZEVEDO NETTO, 2015). Além disso, como consequência desta diminuição, a vazão também diminui, e ocorre estreitamento das linhas de corrente do fluido, o fenômeno da Vena Contracta.

Em termos práticos, o escoamento de fluidos em orifícios tem sido útil na descrição do funcionamento e projeto de estruturas hidráulicas, como reservatórios e unidades de tratamento internas às Estações de Tratamento de Água (Almeida *et al*, 2018). O presente trabalho descreve uma metodologia para determinação experimental do coeficiente de velocidade, de descarga, e de contração para um orifício circular através do experimento do jato de água. Para simular e observar o movimento do escoamento do jato de água foi feito um orifício lateral em uma garrafa pet. Aplicando o software livre Tracker, que usa as imagens de vídeo do experimento, obtém-se as coordenadas do alcance do jato de água, altura do líquido em relação ao orifício, e altura do plano de medida do alcance até o orifício, para obter os coeficientes que caracterizam o orifício lateral.

METODOLOGIA

Para a obtenção dos coeficientes de velocidades, descarga e contração, foi desenvolvido um experimento com materiais de baixo custo utilizando para a montagem/execução do experimento uma garrafa PET (2 Litros) de diâmetro 10,3 cm, um recipiente retangular de plástico, nível bolha, duas fitas métricas, fita adesiva transparente, corante preto, lixa fina, uma folha de isopor de 20 mm para variar a altura do orifício circular em relação ao recipiente plástico e um tripé para a câmera.

O sistema experimental é constituído de uma garrafa PET em que foi retirada a parte superior da garrafa para facilitar o manuseio do líquido no momento do experimento, e garantir que a pressão na superfície do líquido fosse igual à da saída. O orifício lateral foi feito com o auxílio de uma esfera aquecida de aço de diâmetro de 0,45 cm na lateral da garrafa, de maneira que o diâmetro ficou bem próximo ao da esfera. O orifício foi lixado para que não houvesse interferência das rebarbas no jato d'água, como mostra a figura 01.

Figura 01: Garrafa com o orifício finalizado.



Fonte: Autor, 2020.

Após o preparo da garrafa, fixou-se uma fita métrica na garrafa, e outra fita métrica em recipiente retangular de plástico. A altura do orifício circular em relação ao recipiente retangular foi modificada através de camadas feitas de isopor, cada camada com 2 cm de espessura. A figura 02 mostra o sistema experimental.

Figura 02: Sistema Experimental.



Fonte: Autor, 2020.

Após o sistema experimental ser montado, a garrafa foi preenchida com água adicionada de um corante escuro, necessário para uma melhor visualização do jato de água quando escoar pelo orifício circular.

Para a filmagem do experimento foi utilizado um celular com a câmera principal com configurações de 25 megapixels e abertura F/1.7 que ficou preso a um tripé. O uso tripé foi

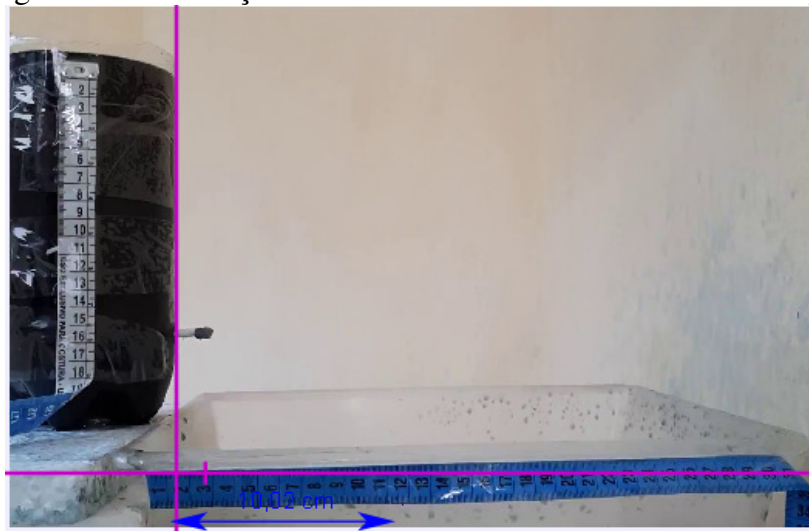
importante, pois foi possível realizar a gravação em uma posição fixa, e assim não modificar a escala das medidas no decorrer do vídeo.

Os dados do experimento foram obtidos com o software livre Tracker versão 5.1.5, que obtém a posição do objeto através de vídeos. A filmagem do experimento foi feita em um local bem iluminado, e utilizou-se a fita métrica para calibração da escala do vídeo.

Após a obtenção dos vídeos para cada situação, cada vídeo é importado para o software Tracker, e analisado individualmente. No ambiente de trabalho do software é necessário adicionar, e mover a origem do eixo cartesiano, que está disponível na aba “TRAJETÓRIA”, para um local que facilite as medidas. Ao adicionar o eixo, o usuário deve se atentar ao grau de inclinação do eixo, e local da origem do eixo.

O passo seguinte é definir as medidas de comprimento do vídeo com o auxílio das “FITAS DE CALIBRAÇÃO” também disponível na aba “TRAJETÓRIA”. Após este passo, aparecerá uma seta, cujas cores podem ser escolhidas pelo usuário, e selecione o objeto de medida conhecida, no caso deste experimento uma das fitas métricas. A figura 3 mostra a janela do Tracker com um dos “frames do vídeo”, em destaque o eixo (na cor lilás) e a fita de calibração (cor azul) da bandeja.

Figura 03: Localização dos eixos cartesianos e da fita de calibração



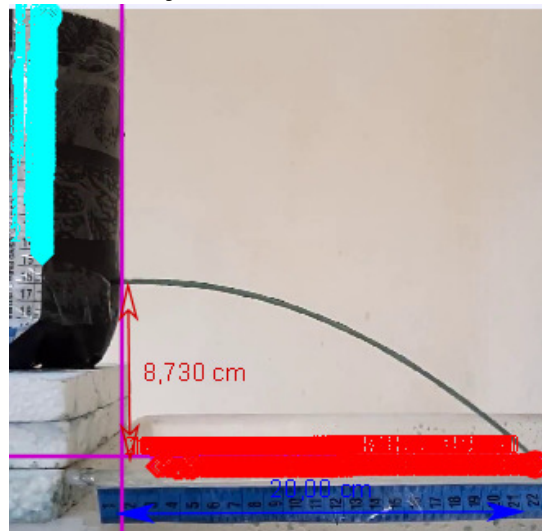
Fonte: Autor, 2020.

Como o software só aceita uma calibração, foi utilizado fita de métrica para conferir se medida na vertical, coincide ou não com a calibração. Quando não coincide, a medida pode ser corrigida.

O próximo passo é a marcação dos pontos locais de interesse que se deseja medir, adicionando um novo “PONTO DE MASSA”, disponível na aba “TRAJETÓRIA”. Neste

a bandeja (medida horizontal). Quando se escolhe um ponto para ser “PONTO DE MASSA”, ao passar para o “frame” seguinte o software pode marcar o ponto seguinte, dependendo do modelo disponível na janela “TRAJETÓRIA AUTOMÁTICA”. Às vezes é necessário atualizar o modelo, para que os pontos sejam marcados de maneira correta, ou fazer marcação manual. Ao usar o software, nota-se que quanto melhor a resolução do vídeo, mais fácil a marcação dos pontos de maneira automática. A figura 04 mostra a marcação dos pontos obtidas com um dos vídeos analisados. As variáveis obtidas são o alcance (variável horizontal – x , cor vermelha), medida a partir do plano do recipiente, e a medida do eixo horizontal até o centro do orifício (H , cor ciano). A variável de interesse $h = H - h_{pf}$, onde h_{pf} é medida do centro do orifício até a média dos valores de y da coordenada y da variável do alcance.

Figura 04: Marcação das coordenadas e o valor de h_{pf} .



Fonte: Autor, 2020.

A partir da análise do experimento, relacionou-se a teoria com as medidas obtidas com o Tracker. A equação de Torricelli é obtida através da equação de Bernoulli, onde a pressão na saída do jato e a pressão na parte superior do recipiente é a atmosférica, e a velocidade do fluido do líquido na parte superior é nula, é dada pela equação 01:

$$v = \sqrt{2gh} \quad (01)$$

onde h é o desnível entre o centro do orifício e a parte superior do recipiente, cujo valor é obtido através da subtração de H e h_{pf} , cujo valor é obtido medindo o centro do orifício e o eixo horizontal com a ferramenta de medida – “FITA MÉTRICA”, disponível na aba “TRAJETÓRIA” do Tracker.

Já o alcance do jato (medida horizontal “ x ”) é o produto da velocidade de saída

(equação 01), e o tempo que o jato sai do orifício e alcança o eixo horizontal. Através da equação horária do movimento uniformemente variado, esse tempo é dado pela equação 02:

$$t = \sqrt{\frac{2h_{pf}}{g}} \quad (02)$$

Após algumas manipulações, o alcance é dado pela equação 03:

$$x = 2\sqrt{h_{pf}h} \quad (03)$$

Para a obtenção dos coeficientes de velocidades, descarga e contração relacionou-se os dados obtidos de cada amostra no Tracker com as definições teóricas. Para o coeficiente de velocidade, a equação 03 foi linearizada, para ajuste linear dos dados do alcance e da altura. A partir da razão da vazão obtida no experimento e da vazão teórica obtém-se o coeficiente de descarga, e relacionando esses dois coeficientes determina-se o coeficiente de contração.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

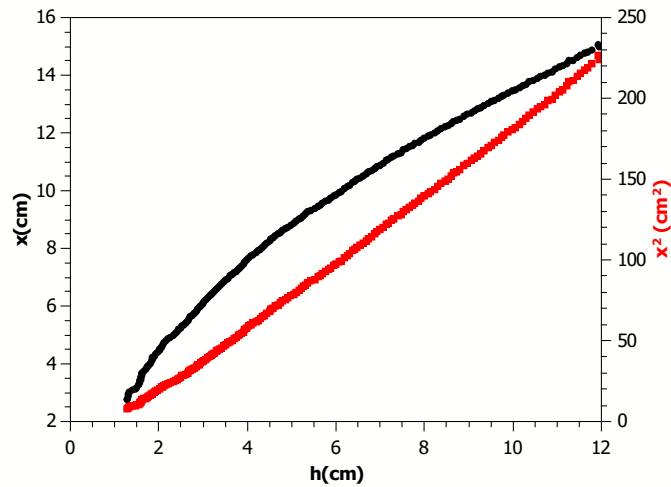
O experimento do jato de água com orifício lateral foi feito com quatro alturas distintas, denominada $h_{pf} = H - h$, definida como a distância entre o plano e o centro do orifício. Cada altura varia aproximadamente 20 mm, que é a espessura do isopor, e foram feitos três ensaios cada altura, e o erro das medidas obtidas com o Tracker é de 0,001 cm.

O Software Tracker fornece gráficos rápidos, como evolução temporal das variáveis, e para a análise proposta neste trabalho, os dados foram exportados para o Excel para uma melhor análise, manipulação, e construção de gráficos.

No entanto, o experimento do Jato de água não é uma situação idealizada pois o fluido utilizado é um fluido real o que limita a aplicação da equação de Torricelli, (HALLIDAY, 2016; NUSSENZVEIG, 2014). Deste modo para determinar o coeficiente de velocidade, realizou-se o ajuste linear das coordenadas obitas na análise de imagens do experimento com o Tracker.

A figura 05 mostra o comportamento de x (cor preta), x^2 (cor vermelha) versus h , evidenciando a não linearidade e a linearidade das variáveis apresentadas.

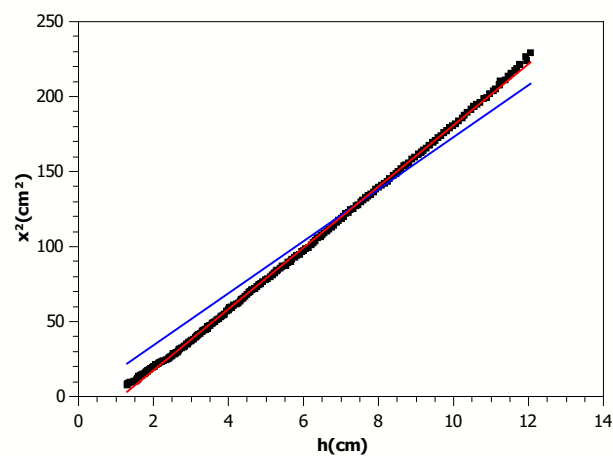
Figura 05: Comportamento não linear de x



Fonte: Autor, 2020.

O ajuste proposto inicialmente foi “ $x^2 = ah$ ”, onde a é o coeficiente angular. Ao fazer este ajuste observou-se que ele não coincidiu com os dados (linha azul da figura 06). Considerou-se um ajuste linear do tipo ($x^2 = ah + b$), sendo mais compatível com os dados do experimento (linha vermelha da figura 06). Um dos critérios para a decisão do ajuste foi o valor de “ R^2 ”, sendo escolhido o mais próximo de 1,0. Na primeira proposta de ajuste o valor de R^2 é 0,9697, e na segunda proposta, 0,9992. A figura 06 mostra o comportamento de x^2 versus h para uma das amostras estudadas, com as propostas de ajuste comentadas neste parágrafo.

Figura 06: Comportamento do x^2 versus h .



Fonte: Autor, 2020.

A tabela 01 apresenta as variáveis obtidas com o melhor ajuste, seus respectivos erros padrões para cada amostra analisada, e o valor do R^2 .

Tabela 01: Valores dos coeficientes obtidos com o ajuste linear.

h_{pf} (cm)	a	$\Delta\bar{a}$	b	$\Delta\bar{b}$	R^2
6,5	16,79	0,03	-45,4	0,3	0,9996
6,7	18,9	0,02	-24,1	0,2	0,9998
6,8	18,61	0,02	-21,00	0,2	0,9998
8,5	21,39	0,04	-32,6	0,3	0,9996
8,8	23,35	0,05	-35,6	0,5	0,9993
8,7	25,07	0,04	-31,2	0,4	0,9997
10,9	30,12	0,09	-37,5	0,8	0,9986
11,1	32,09	0,09	-38,2	0,8	0,9988
10,8	31,15	0,08	-49,8	0,7	0,9989
13,0	33,24	0,06	-93,2	0,6	0,9995
13,0	37,94	0,09	-86,4	0,9	0,9991
13,1	38,53	0,1	-95,6	1,0	0,999

Fonte: Autor, 2020.

Os valores de h_{pf} não são iguais, pois depende do valor da coordenada y do “ponto de massa” do alcance no software utilizado na análise do experimento. Ao analisar a tabela 01 foi observado que os coeficientes angulares dos ajustes são menores que previstos teoricamente, $a \leq 4h_{pf}$. Experimentalmente é observado que a velocidade que o fluido sai do orifício (velocidade experimental, v_e) difere da teórica (equação de Torricelli, v), e o coeficiente de velocidade (c_v) relaciona estas velocidades, como pode ser visto na equação 04:

$$c_v = \frac{v_e}{v} \quad (04)$$

Desta forma, a nova expressão do alcance (x) em função de c_v é dada pela equação 05:

$$x = c_v 2\sqrt{h_{pf}h} \quad (05)$$

Assim, o coeficiente angular dos ajustes a é dado pela equação 06:

$$a = c_v^2 4h_{pf} \quad (06)$$

Isolando c_v na equação 07:

$$c_v = \sqrt{\frac{a}{4h_{pf}}} \quad (07)$$

Para calcular o erro do coeficiente de velocidade levando em conta as incertezas de a e h_{pf} utilizou-se a técnica da propagação de erro (TAYLOR, 2012).

$$\Delta\bar{c}_v = \bar{c}_v \sqrt{\left(\frac{1}{2} \frac{\Delta\bar{a}}{\bar{a}}\right)^2 + \left(\frac{1}{2} \frac{\Delta h_{pf}}{h_{pf}}\right)^2} \quad (08)$$

A tabela 02 mostra o valor médio do coeficiente de velocidade, \bar{c}_v , para cada amostra

estudada, e o seu desvio padrão, $\Delta\bar{c}_v$.

Tabela 02: Valor médio e desvio padrão de c_v para cada amostrada estudada.

h_{pf}	\bar{c}_v	$\Delta\bar{c}_v$	h_{pf}	\bar{c}_v	$\Delta\bar{c}_v$
6,5	0,804	0,002	10,9	0,833	0,003
6,7	0,840	0,002	11,1	0,852	0,003
6,8	0,830	0,002	10,8	0,850	0,002
8,5	0,794	0,002	13,0	0,800	0,002
8,8	0,814	0,002	13,0	0,854	0,002
8,7	0,848	0,002	13,1	0,856	0,002

Fonte: Autor, 2020.

Analisando a tabela 02 foi observado que os valores de \bar{c}_v são bem próximos, e não dependem de h_{pf} . O valor médio de $\bar{c}_v=0,83$, e o desvio padrão das 12 amostras, $\Delta\bar{c}_v=0,02$.

O coeficiente linear b obtida através do ajuste linear, como apresentado na tabela 01, é nula, sendo incoerente com o modelo apresentado na equação 05 assim aplicou-se um teste de hipótese de T-Student com um nível de confiança de 95% para saber se o valor não nulo era resultado de erros experimentais, e a hipótese não foi confirmada.

Deste modo, é possível que isso ocorreu devido ao comportamento do fluido real, que além de possuir viscosidade, possui outras características como a presença da tensão superficial. Essa tensão faz com que o líquido pare de escoar mesmo com a água acima do nível do orifício (PLAUSKA, 2013). Então, de acordo com os estudos de Geraldo Claret Plauska (2013), utilizou-se uma altura denominada h_0 para justificar a presença do coeficiente linear b .

Modificando novamente a expressão do alcance (x), equação 05, incluindo a presença de h_0 , equação 09:

$$x = c_v 2\sqrt{h_{pf}(h - h_0)} \quad (09)$$

Logo, o coeficiente linear do ajuste é apresentado na equação 10:

$$b = c_v^2 4h_{pf}h_0 \quad (10)$$

Isolando h_0 na equação 11:

$$h_0 = \frac{b}{c_v^2 4h_{pf}} \quad (11)$$

Para calcular o erro de h_0 levando em conta as incertezas de b , h_{pf} e c_v , novamente utilizou-se a técnica da propagação de erros equação 12 (TAYLOR, 2012).

$$\Delta\bar{h}_0 = \bar{h}_0 \sqrt{\left(\frac{\Delta\bar{b}}{\bar{b}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta\bar{h}_{pf}}{\bar{h}_{pf}}\right)^2 + \left(2\frac{\Delta\bar{c}_v}{\bar{c}_v}\right)^2} \quad (12)$$

A tabela 03 mostra o valor médio do coeficiente de velocidade, $\overline{h_0}$, para cada amostra estudada, e o seu desvio padrão, $\Delta\overline{h_0}$.

Tabela 03: Valor médio e desvio padrão de h_0 para cada amostrada estudada.

h_{pf}	h_0	$\Delta\overline{h_0}$	h_{pf}	h_0	$\Delta\overline{h_0}$
6,5	-2,7	0,02	10,9	-1,25	0,03
6,7	-1,28	0,01	11,1	-1,19	0,03
6,8	-1,13	0,01	10,8	-1,60	0,02
8,5	-1,52	0,01	13,0	-2,80	0,02
8,8	-1,52	0,02	13,0	-2,28	0,02
8,7	-1,24	0,02	13,1	-2,48	0,03

Fonte: Autor, 2020.

Analisando a tabela 03, observa-se que os valores de $\overline{h_0}$ possuem erros na primeira casa decimal, e espera-se que este valor não dependa de h_{pf} e sim do recipiente. O valor médio de $\overline{h_0}=1,7$, e o desvio padrão das 12 amostras, $\Delta\overline{h_0}=0,3$.

Como a velocidade que o fluido sai pelo orifício é diferente da previsão teórica, logo a vazão também é modificada. O coeficiente de descarga c_d relaciona a vazão experimental, Q_e , e a vazão teórica, Q , como pode ser visto na equação 13.

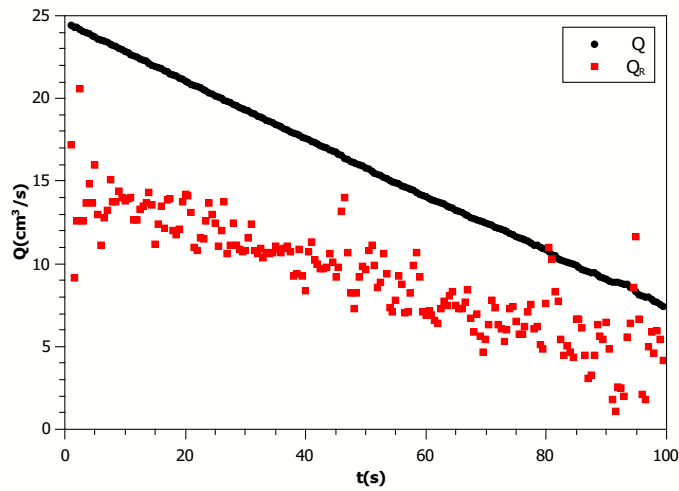
$$c_d = \frac{Q_e}{Q} \quad (13)$$

A vazão teórica (Q) é o produto da área do orifício lateral ($A_o = \pi r_f^2$) e a velocidade teórica, dada pela equação de Torricelli. A vazão experimental Q_e é obtida através do produto da área da seção transversal do recipiente ($A_r = \pi r_g^2$), e a velocidade instantânea da altura do líquido (v_h), que foi aproximada pelo método da derivada centrada, como pode ser visto pela equação 14.

$$v_h = \frac{h(t+\Delta t) - h(t-\Delta t)}{2\Delta t} \quad (14)$$

A figura 07 mostra a evolução temporal da vazão experimental (Q_e), quadrados vermelhos, e a teórica (Q), círculos pretos para uma das amostras estudadas.

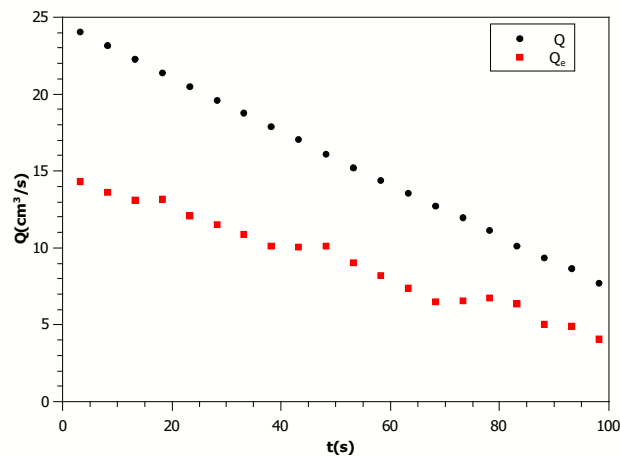
Figura 07: Evolução temporal das vazões teórica e experimental



Fonte: Autor, 2020.

Devido à grande flutuação da velocidade v_h , foi feito a média dos valores a cada dez pontos. A figura 08 mostra o resultado cujo objetivo foi diminuir a flutuação dos valores do coeficiente de descarga c_d .

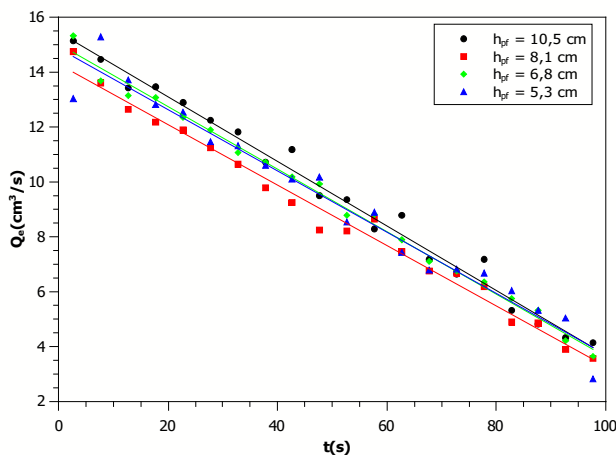
Figura 08: Q e Q_e para a mesma amostra da figura 07.



Fonte: Autor, 2020.

A figura 09 mostra a evolução temporal de Q_e . Os valores das inclinações se diferenciam na segunda casa decimal que pode ser explicado pelas diferentes alturas iniciais de cada amostra.

Figura 09: Evolução temporal de Q_e para diferentes alturas.



Fonte: Autor, 2020.

A tabela 04 mostra os valores de c_d para cada amostra estudada. O valor médio de $\bar{c}_d = 0,64$, e o desvio padrão é $\Delta\bar{c}_d = 0,03$ para as doze amostras estudadas.

Tabela 04: Valor médio e desvio padrão de c_d para cada amostrada estudada.

h_{pf}	c_d	$\Delta\bar{c}_d$	h_{pf}	c_d	$\Delta\bar{c}_d$
6,5	0,6	0,04	10,9	0,7	0,05
6,7	0,62	0,04	11,1	0,67	0,05
6,8	0,62	0,06	10,8	0,67	0,04
8,5	0,65	0,05	13,0	0,61	0,09
8,8	0,65	0,06	13,0	0,64	0,1
8,7	0,64	0,05	13,1	0,64	0,05

Fonte: Autor, 2020.

Nos experimentos de jato de água é esperado a diminuição da área do jato, um denominada de Vena Contracta. Este efeito acontece devido a velocidade de saída do jato imediatamente após orifício ser menor que a teoria o que resulta numa pressão maior que a pressão atmosférica (NUSSENZVEIG, 2014). O coeficiente que caracteriza esse efeito é o de contração, c_c , definido como a razão entre as áreas da seção contraída (A_c) e a área do orifício (A_o), como pode ser visto na equação 15.

$$c_c = \frac{A_c}{A_o} \quad (15)$$

Após algumas manipulações matemáticas, o coeficiente de descarga (c_d) se relaciona com o coeficiente de velocidade (c_v) e o de contração (c_c) equação 16:

$$c_d = c_c c_v \quad (16)$$

Utilizando os valores dos coeficientes obtidos anteriormente na equação 16 se obtém o coeficiente de contração. E a partir da técnica da propagação de erros (TAYLOR, 2012), obtém-se o desvio padrão para este coeficiente, como pode ser visto na equação 17.

$$\Delta \bar{c}_c = \bar{c}_c \sqrt{\left(\frac{\Delta \bar{c}_d}{\bar{c}_d}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \bar{c}_v}{\bar{c}_v}\right)^2} \quad (17)$$

A tabela 05 mostra os valores de c_c , cujo valor médio é 0,77, e o desvio padrão, 0,04, para as doze amostras estudadas.

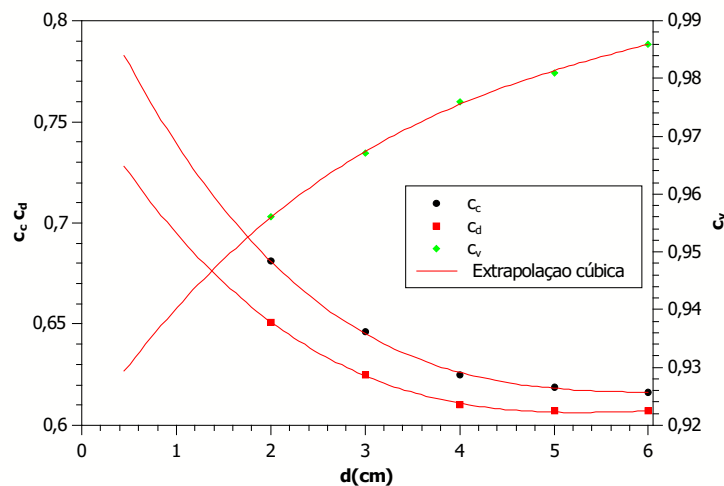
Tabela 05: Valor médio e desvio padrão de c_c para cada amostrada estudada.

h_{pf}	\bar{c}_c	$\Delta \bar{c}_c$	h_{pf}	\bar{c}_c	$\Delta \bar{c}_c$
6,5	0,75	0,05	10,9	0,84	0,06
6,7	0,74	0,05	11,1	0,78	0,06
6,8	0,75	0,07	10,8	0,78	0,05
8,5	0,82	0,06	13,0	0,8	0,1
8,8	0,8	0,07	13,0	0,7	0,1
8,7	0,75	0,06	13,1	0,74	0,06

Fonte: Autor, 2020.

Para comparar os valores obtidos neste trabalho, será usado os dados das tabelas A-5.1.2-a, A-5.1.2-b e A-5.1.2-c do livro Manual de Hidráulica de Azevedo Netto (2015, pág. 74 e 75) para $h = 0,4$ m dos coeficientes de velocidade, descarga e contração versus o diâmetro do orifício. Para obter os dados para $d = 0,45$ cm, foi feito uma extrapolação cúbica, como pode ser visto na figura 10.

Figura 10: Curva de extrapolação cúbica para $d = 0,45$ cm de c_v , c_d , e c_c



Fonte: Autor, 2020.

A tabela 06 sintetiza os coeficientes obtidos neste trabalho, os valores extrapolados para $d = 0,45$ cm, e o erro relativo percentual, considerando o valor extrapolado como o de referência.

Tabela 06: Coeficientes de velocidade, descarga e contração.

	Trabalho	Extrapolado	ε (%)
\bar{c}_v	0,83	0,929	10,7
\bar{c}_d	0,64	0,728	10,1
\bar{c}_c	0,77	0,783	1,7

Fonte: Autor, 2020.

Como pode ser visto na tabela 06, o erro relativo dos coeficientes de velocidade e de descarga foram em média 10,4%, e o de contração, 1,7%. Assim, os valores obtidos dos coeficientes deste estudo são compatíveis com os valores extrapolados utilizando os dados disponíveis em Azevedo Netto (2015, pág. 74 e 75), confirmam os efeitos de redução de velocidade, diminuição da vazão, e a diminuição da área da seção transversal do jato de água, comprovando a diferença entre a teoria idealizada e o experimento.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo proposto para determinação dos coeficientes de velocidade, descarga e contração utiliza o software Tracker versão 5.1.5 para análise de dados de imagens de vídeo em um experimento do jato de água que utilizou materiais de baixo custo, ampliou a compreensão e a discussão das limitações do modelo teórico para estudar o escoamento de fluidos, em específico a água.

As coordenadas do alcance do jato de água, a altura do líquido em relação ao orifício e a altura do orifício até o plano de medida obtidas no Tracker evidenciaram que o alcance do jato de água era proporcional a raiz quadrada da altura do líquido ao realizar o ajuste linear dos dados, observou-se a existência do coeficiente linear (b) não nulo, e ao aplicar o teste T student ficou comprovado que o coeficiente linear (b) não era fonte de erros experimentais. A partir do coeficiente angular (a) determinou-se o coeficiente de velocidade do jato de água em que a velocidade do fluido que saiu do orifício circular era menor que a prevista na teoria. Uma vez que a velocidade apresentou comportamento distinto da previsão teórica,

(83) 3322.3222 determinou-se o coeficiente de descarga com a razão da vazão experimental do sistema e da

vazão teórica constatando-se uma diminuição da vazão. Utilizando os valores dos coeficientes de velocidade e de descarga obteve-se o coeficiente de contração com valor menor do que um, confirmando a redução da área da seção transversal do jato.

Assim, esse estudo demonstra que a ferramenta computacional Tracker pode ser utilizada para determinar os coeficientes de velocidade, descarga e contração no experimento de jato de água, considerando o comportamento do fluido real e os ajustes matemáticos. O software Tracker é gratuito, e pode ser uma alternativa na substituição dos kits didáticos utilizados para estudo do comportamento dos fluidos.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Antonia Samylla Oliveira, *et al.* Determinação do coeficiente de descarga para orifícios de parede delgada considerando números de Reynolds reduzidos. Revista DAE, n. 210, v. 66, pág. 24-34. abril de 2018. Disponível em: < http://revistadae.com.br/artigos/artigo_edicao_210_n_1715.pdf >. Acesso em: 02 de out. 2020.

AZEVEDO NETTO, J. M.; FERNÁNDEZ Y FERNÁNDEZ, M. Manual de hidráulica. 9^o ed. São Paulo: Blucher, 2015.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; e WALKER, Jearl. Fundamentos de Física - Gravitação, Ondas e Termodinâmica - Volume 2. 10^a ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

NUSSENZVEIG, Herch Moysés. Curso de Física Básica - Vol. 2 Fluidos, Oscilações e Ondas, Calor. 5^a ed. São Paulo: Blucher, 2014.

PLAUSKA, Geraldo Claret. Experimento e aprendizagem: Uma aula introdutória à mecânica dos fluidos. Dissertação de mestrado – UFRJ, Rio de Janeiro-RJ, 2013. Disponível em: < https://www.if.ufrj.br/~pef/producao_academica/dissertacoes/2013_Geraldo_Plauska/material_instrucional_Geraldo_Plauska.pdf >. Acesso em: 20 set. 2019.

TAYLOR, John R., Introdução à Análise de Erros: o estudo de incertezas em medições físicas. 2^o ed. Porto Alegre: Bookman, 2012.

TRACKER – Video Analysis and Modeling Tools. Versão 5.1.5 Disponível em: <<https://physlets.org/tracker/>>. Acesso em 10 out. 2019.