

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

JOAB COSTA DOS SANTOS

**UMA REVISÃO SOBRE A AVALIAÇÃO DA PERDA DE CARGA EM
CONDUTOS FORÇADOS.**

CRUZ DAS ALMAS - BA

2022

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
BACHARELADO EM CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS**

JOAB COSTA DOS SANTOS

**UMA REVISÃO SOBRE A AVALIAÇÃO DA PERDA DE CARGA EM
CONDUTOS FORÇADOS.**

Trabalho de Conclusão de curso submetido ao Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia - Campus Cruz das Almas, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Dr. Jorge Luiz Rabelo

CRUZ DAS ALMAS-BA

2022

JOAB COSTA DOS SANTOS

**UMA REVISÃO SOBRE A AVALIAÇÃO DA PERDA DE
CARGA EM CONDUTOS FORÇADOS**

Relatório final, apresentado à
Universidade Federal do Recôncavo
da Bahia, como parte das exigências
para a obtenção do título de Bacharel
em Engenharia Civil.

Cruz das Almas - BA, 08 de março de
2022.

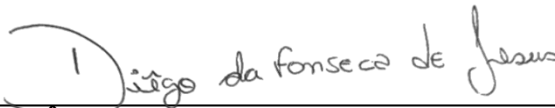
BANCA EXAMINADORA



Prof. JORGE LUIZ RABELO



Prof. FRANCIS VALTER PÊPE FRANÇA
DEA/UFBA



Eng. DIÊGO DA FONSECA DE JESUS
CETEC/UFRB

Santos, Joab Costa dos

Uma revisão sobre a avaliação da perda de carga em condutos forçados. / Joab Costa dos Santos. - Cruz das Almas, 2022.

52 p. : 30 cm

Orientador: Jorge Luiz Rabelo.

TCC (Graduação - Bacharelado em Engenharia Civil) --
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Cruz das Almas, 2022.

1. Equações de perda de carga. 2. Condutos forçados. 3. Bernoulli. 4. Darcy-Weisbach. 5. Manning. 6. Hazen-Willians. I. Joab, Jorge. II. Uma revisão sobre a avaliação da perda de carga em condutos forçados.

DEDICATÓRIA

8m:46s <A short time can feel like an eternity>

8:38 - *"Please, please, please.*

8:14 - *"Please man."*

8:04 - *"I can't breathe."*

7:53 - *"I'm about to die."*

7:43 - *"I can't breathe. I can't breathe."*

7:33 - *"Get up, get in the car!" "I can't move."*

7:12 - *"Mama! Mama!"*

6:17 - *"Everything hurts. I need some water or something. Please. I can't breathe, officer."*

5:48 - *"They going to kill me. They're going to kill me, man."*

3:30 - *"Come on, man"*

3:-- - *"I cannot breathe. I cannot breathe"*

3:-- - *"They're going to kill me. They're going to kill me. I can't breathe."*

-- - *"I can't breathe."*

-- - *"Please, sir. Please."*

-- - *"Please."*

George Perry Floyd Jr (1973 - 2020).

RESUMO

Através de vários séculos, o relacionamento passivo do ser humano com a água evoluiu para ativo, em decorrência de imposições significativas, não apenas de natureza humana mas também devido à própria natureza de escassez do recurso natural. A partir do momento em que a ciência coletiva se fez presente, de uma forma geral, a relação ativa adentra inicialmente o âmbito da compreensão do fenômeno para, depois de algumas décadas, tangenciar níveis de controle, dentre os quais estão as formulações de perda de carga em condutos forçados. Este trabalho teve como objetivo realizar uma pesquisa exploratória a fim de explicitar o conhecimento sobre as formulações para a quantificação da perda de carga em condutos forçados. As avaliações das perdas de carga foram também apresentadas de forma cronológica, com o intuito de oferecer ao leitor uma visão individual das contribuições, bem como, sua relação com o desenvolvimento do tema como um todo. Nesta longa linha do tempo, formada por mais de dois séculos de evolução dos modelos de estimativa de perda de carga, este trabalho evidenciou alguns marcos atrelados a significativas contribuições para a evolução da compreensão e controle deste fenômeno, que se iniciaram com os fundamentos de Daniel Bernoulli e seguiram até os modelos de Manning e Hazen-Williams. Apesar da reconhecida relevância de todas as contribuições levantadas, foi feita uma avaliação da notoriedade das contribuições, em bases recentes, tendo se destacado as contribuições de Bernoulli, Darcy-Weisbach, Manning e Hazen-Williams.

Palavras-chave: equações de perda de carga, condutos forçados, Bernoulli, Darcy-Weisbach, Manning, Hazen-Williams.

ABSTRACT

Through several centuries, the passive relationship of the human with water developed to the active one, in reason of significant impositions, not only human nature reason, but also the scarcity nature of the natural resource reason. From the moment that a collective science was present, , in general, the active relationship initially walk into the scope of understanding the phenomenon, and them, after a few decades, starts touch a control levels, like the head loss equations in penstocks. . This academic text aimed to make an exploratory research in order to clarify the knowledge about the formulations for the quantification of pressure loss in penstocks. The head loss equations were also proposed in a chronological way, with purpose to offer the reader an custom view of the contributions as an relation of custom view with the contributions of the whole. In this long timeline, formed by more than two centuries of evolution of science works models to head loss estimation, this academic text showed some milestones to signifcant contributions to the evolution of understanding and control of this phenomenon, which began with the fundamental equations proposed byDaniel Bernoulli and continued to the models proposed by Manning and Hazen-Williams. Although the evaluation of all the contributions reseached in this academic text, an evaluation of the proeminence of contributions was made, in recent bases, having been highlighted the contributions of: Bernoulli, Darcy-Weisbach, Manning and Hazen-Williams.

Keywords: Pressure loss, Head loss equation, Bernoulli, Darcy-Weisbach, Manning, Hazen-Williams.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Perfil teórico de um Qanats.	3
Figura 2: Foto de galeria horizontal de um Qanats.....	4
Figura 3: Plataforma de banho feita com tijolos planos com pequeno ralo de um lado do piso. 5	
Figura 4: Vista de perto da saída de drenagem	5
Figura 5: Representação gráfica da equação de Bernoulli.....	10
Figura 6 : escoamento laminar, transitório e turbulento.....	18
Figura 7: Esquema do perfil de velocidade sobre placa plana, na camada limite laminar, regiões I e II.....	20
Figura 8: Harpa de Nikuradse.....	23
Figura 9: Diagrama de Moody.....	25
Figura 10: Diagrama de Rouse.	26
Figura 11: Distribuição temporal de significativas contribuições para a evolução dos modelos de previsão de perda de carga em condutos forçados.	32
Figura 12(a): Quantidade de pesquisas referenciada por cientista, com base em dados obtidos em revistas e artigos	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Regimes de escoamento e número de Reynolds 19

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Principais pensadores da teoria hidráulica	6
Quadro 2: Principais autores que formularam hipóteses para perda de carga.....	17
Quadro 2: Principais autores que formularam hipóteses para perda de carga.....	18
Quadro 3: Principais autores que formularam hipóteses especificamente para perda de carga, em ordem cronológica	33
Quadro 3: Principais autores que formularam hipóteses especificamente para perda de carga, em ordem cronológica	34
Quadro 4: Principais pesquisadores/modelos e as respectivas aplicações de seus métodos....	36

SUMÁRIO

1.0	INTRODUÇÃO	1
2.0	OBJETIVOS	2
2.1	Objetivo Geral	2
2.2	Objetivos Específicos	2
3.0	METODOLOGIA.....	2
3.1	Classificação da pesquisa	2
4.0	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	3
4.1	Da Gênese à busca por projetos eficientes	3
4.2	Precursos da Teoria Hidráulica da perda de carga	8
4.2.1	Daniel Bernoulli	8
4.2.2	Antoine de Chézy	11
4.2.3	Gaspard de Prony	11
4.2.4	Julius Weisbach	12
4.2.5	Henry Darcy	12
4.2.6	Maurice Lévy	14
4.2.7	Robert Manning	14
4.2.8	Hazen-Williams.....	15
4.2.9	Fair-Whipple-Hsiao.....	15
4.2.10	Fred Charles Scobey	16
4.2.11	Outras contribuições	17
4.3	Fator de atrito e a classificação dos escoamentos.....	18
4.3.1	Hagen-Poiseuille.....	21
4.3.2	Heinrich Blasius	22
4.3.3	Johan Nikuradse	22
4.3.4	Cyril Colebrook e Cedric White	24
4.3.5	Lewis Moody	24
4.3.6	Hunter Rouse.....	25
4.3.7	Swamee-Jain.....	26
4.4	Formulações teóricas e aplicações hidráulicas.	27
5.0	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	29
6.0	CONCLUSÃO	37
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	38

1.0 INTRODUÇÃO

Desde os mais remotos registros, como o descrito em Gênesis 1:9-10, em que Deus prosseguiu, dizendo: “Ajuntem-se as águas debaixo dos céus num só lugar e apareça a terra seca.”, que a água sempre esteve presente em toda a história da humanidade, não sendo apenas uma limitação para a existência da vida humana, animal e vegetal, mas também uma condição para a evolução das sociedades humanas, de modo que, nos dias atuais, são diversas aplicações das quais o ser humano estabelece algum tipo de relação com a água, tais como: uso da água em sistemas de irrigação e drenagem, uso da água como insumo em diferentes setores produtivos, uso da água para geração de energia, transporte, reservação, tratamento e controle de água para abastecimento público e uso da água para combate a incêndios. Apesar da inegável dependência, tanto fisiológica quanto econômica, por algumas vezes, ao longo da história da humanidade, este recurso foi utilizado de forma não tão coerente com o nível de importância cabível para um recurso limitado.

Neste cenário, as discussões acerca das perdas de carga, em especial a perda de carga contínua em condutos forçados, oportunizam reflexões sobre a necessidade da busca por projetos hidráulicos cada vez mais eficientes.

A perda de carga, entendida de uma forma geral como a transformação da energia cinética e/ou potencial em calor, pode ocorrer de duas formas, perda de carga contínua que ocorre ao longo da tubulação e perda de carga localizada que ocorre em pontos onde há a presença de desvios ou conexões. Há ainda uma outra forma de perda, conhecida como perda física, que pode ser entendida como a perda de água em tubulações devido a vazamentos. Estas perdas físicas ocasionam tanto a redução da pressão interna das tubulações quanto o desperdício do recurso natural e, ambos as situações, implicam em custos financeiros extras, seja devido necessidade de complementar a perda de pressão interna, por exemplo aumentando a potência de um sistema de bombeamento, seja devido ao pagamento por um recurso que não é utilizado.

No que tange aos modelos matemáticos para previsão de perda de carga, por muitos e muitos anos, diversos experimentos hidráulicos e hidrodinâmicos vêm construindo um conjunto de fundamentos que forma a base da engenharia hidráulica. Dentre os quais destacam-se: Bernoulli; Chézy; Prony; Weisbach; Darcy; Hazen-Williams e outros. Isso sugere que, dentro da perspectiva histórica, os modelos matemáticos de previsão de perda de carga, em condutos abertos ou fechados, atingiram um nível significativo de precisão. Alguns trabalhos acadêmicos discutem essas e outras contribuições associadas ao tema, tais como no artigo *The History of the Darcy-Weisbach Equation for Pipe Flow Resistance* (Brown, 2002), *Darcy, Forchheimer, Brinkman and Richards: classical hydromechanical equations and their significance in the light of the TPM* (Ehlers, 2020); Tributo aos fundadores da ciência hidrogeológica (Machado, 2008); e em livros, tais como: *History of Hydraulics* (Rouse and Ince), *History of Fluvial Hydraulics* (R.J. Garde).

Dessarte, este trabalho oferece um mergulho no passado, em ordem cronológica, apresentando uma revisão das principais contribuições para a quantificação da perda de carga em condutos forçados.

2.0 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Realizar uma pesquisa exploratória a fim de explicitar o conhecimento sobre as formulações para a quantificação da perda de carga em condutos forçados, e permitir a construção de uma perspectiva cronológica para este fenômeno.

2.2 Objetivos Específicos

- a) Apresentar uma revisão teórica cronológica acerca da relação do ser humano com tecnologias hidráulicas, com vinculação à perda de carga;
- b) Apresentar uma revisão bibliográfica acerca do desenvolvimento e evolução das formulações para a perda de carga em condutos forçados;
- c) Apresentar uma visão cronológica de síntese das contribuições e formulações de perda de carga em condutos forçados;
- d) Estimar a notoriedade das contribuições referidas, por quantificação, em período recente, do número de publicações e de consultas na Web.

3.0 METODOLOGIA

3.1 Classificação da pesquisa

Consoante Menezes *et al* (2019), existem diversos tipos de pesquisa e também diferentes formas de classificação e, devido a essa variação, "cada pesquisador define seu objetivo de estudo levando em consideração os objetivos da pesquisa e como ele pretende alcançá-los". (Menezes *et al*, 2019)

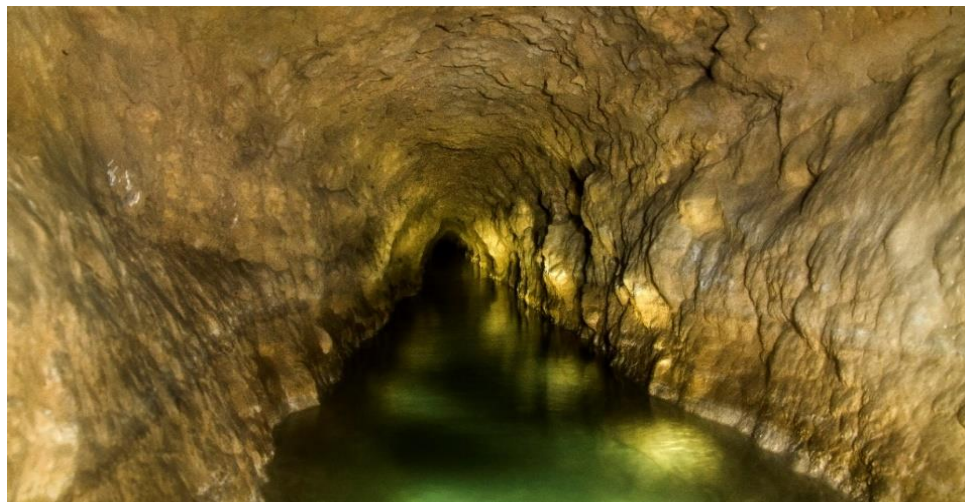
Quanto aos objetivos, esta pesquisa classifica-se em exploratória, uma vez que busca fornecer ao leitor uma visão cronológica sobre as principais abordagens dadas ao problema da perda de carga em condutos forçados.

Quanto à temporalidade, esta pesquisa pode ser classificada como longitudinal, quando busca observar uma mesma variável de interesse, modelos de previsão de perda de carga, em diferentes grupos ou por perspectivas de diferentes autores ao longo de um período de tempo.

Quanto aos procedimentos de coleta esta pesquisa classifica-se em bibliográfica e de levantamento. A primeira característica se deve ao fato desta pesquisa levar em consideração fontes bibliográficas, como livros, artigos, jornais virtuais e textos extraídos da *internet*. A segunda característica se deve ao fato deste trabalho pretender extrair uma determinada informação a partir de dados coletados da *internet* e analisados de forma gráfica e quantitativa.

Segundo Baptista e Pinto (2010), a função essencial destas estruturas seria o transporte de água evitando elevada evaporação presente na região durante o verão. Ainda segundo os autores, uma função extra ao sistema seria a recarga dos aquíferos.

Figura 2: Foto de galeria horizontal de um Qanats.



Fonte: Mohse, T. 2015.

Conforme a Figura 2, seria razoável pensar, para a época em que foram construídos, que não houve uma preocupação com a perda de carga nestas estruturas que, aparentemente, poderiam se comportar ora como conduto livre ora como conduto forçado. Seria razoável atribuir como motivo da inexistência de uma regularização a inexistência de materiais e equipamentos próprios para este propósito ou então que, tendo como segundo objetivo a possível recarga de aquíferos, a regularização da superfície interna poderia comprometer o processo de percolação de água, e dessa forma o objetivo seria deixar a superfície o mais natural possível.

Um outro exemplo de artefato hidráulico pode ser visto em um dos achados da civilização das cidades de Harappa e Mohenjo-daro (3.200 aC), onde é razoável entender que houve uma maior preocupação com a questão da perda de carga, conforme as Figuras 3 e 4. Nesta civilização foi verificado o desenvolvimento de um sistema de esgotamento sanitário que, aparentemente, funcionaria sobre pressão atmosférica e sobre gravidade. Este dispositivo apresenta um conceito, talvez empírico, de controle de perda de carga, através da utilização de superfícies mais regulares, porém, a existência deste conceito empírico não pode ser afirmada devido à degradação natural provocada pelo tempo. (Harappa.com).

Figura 3: Plataforma de banho feita com tijolos planos com pequeno ralo de um lado do piso.



Fonte: Harappa.com

Figura 4: Vista de perto da saída de drenagem



Fonte: Harappa.com

Segundo Rouse (1957), *apud* Baptista e Pinto (2016), os primeiros registros científicos relativos a formulações teóricas da hidráulica são atrelados aos gregos, a partir de estudos de Arquimedes (século III a.C) e Hero da Alexandria (século II a.C). Dessa forma, aos gregos é dado o crédito de grandes inovações no plano intelectual relativo ao desenvolvimento da teoria hidráulica.

A partir dos gregos, uma série de pensadores proporcionaram avanços significativos para o entendimento da teoria hidráulica. Baptista e Pinto (2016) citam alguns dos notáveis hidráulicos e suas contribuições, a partir de Arquimedes (287 a.C. – 212 a.C) até Ven Te Chow (1919 – 1981), conforme Quadro 1 a seguir.

Quadro 1: Principais pensadores da teoria hidráulica

Nome	Origem e Período	Contribuições principais
Arquimedes	Siracusa 287 a.C. – 212 a.C.	Primeiro texto conhecido sobre a Hidráulica; introduziu o conceito de empuxo.
Leonardo da Vinci	Itália 1452 – 1519	Elaborou estudos e projetos dentro dos conceitos atuais de Engenharia Hidráulica
Evangelista Torricelli	Itália 1608 – 1647	Pioneiro de estudos experimentais; estudos de orifícios e jatos.
Daniel Bernoulli	Holanda 1700 – 1782	Precursor de abordagem teórica da Hidráulica.
Leonhard Euler	Suíça 1707 – 1783	Equações gerais do movimento dos fluidos perfeitos
Antonie Chézy	França 1718 – 1798	Estudos experimentais relativos à resistência ao escoamento.
Jean Charles de Borda	França 1733 – 1799	Estudo do escoamento junto a embarcações, bombas e orifícios; expressões para cálculo de perdas de carga localizadas.
Louis Marie Henri	França 1735 – 1836	Contribuição teórica à Hidrodinâmica.
Navier Gaspard Gustave de Coriolis	França 1792 – 1843	Aceleração em sistemas em rotação; Introdução de coeficientes para velocidade.
Jean-Claude Barré de Saint Venant	França 1797 – 1886	Escoamento não permanente.
Henri-Philibert-Gaspard Darcy	França 1803 – 1858	Escoamento em meios porosos e em tubulações
Ludwig-Julius Weisbach	1806 – 1871	Contribuições experimentais concernentes à resistência ao escoamento.
William Froude	Inglaterra 1810 – 1879	Modelagem física em Hidráulica.
Robert Manning	Irlanda 1816 – 1897	Proposição e divulgação de expressões de resistência ao escoamento em canais abertos.
George Gabriel Stokes	Irlanda 1819 – 1903	Equações gerais do escoamento.

Continua

Quadro 1: Principais pensadores da teoria hidráulica

Orbone Reynolds	Irlanda 1842 – 1912	Conciliação de resultados experimentais e teóricos.
Joseph Boussinesq	França 1842 – 1929	Contribuição teórica ao estudo de coeficientes de velocidade e turbulência.
Boris Bakhmettef	Rússia 1880 – 1951	Ressalto hidráulico e energia nos escoamentos livres.
Ven Te Chow	China 1919 – 1981	Consolidação e divulgação da Hidráulica e Hidrologia.

Fonte: Baptista e Pinto, 2016.

A partir de um determinado momento, análises empíricas passaram a nortear o que seria chamada posteriormente de teoria hidráulica dos fluidos e esta, algum tempo depois, atingiria resultados e previsões mais precisos a partir da inserção de modelos fundamentados em métodos científicos teóricos, tais como Darcy-Weisbach e Hazen-Williams. Dessa forma, à luz da evolução da teoria hidráulica, os projetos de engenharia passaram a atingir níveis cada vez mais precisos, por exemplo, de previsão da perda de carga.

A previsão da perda de carga foi um dos tópicos que a teoria hidráulica se debruçou ao longo de alguns séculos e é tema principal deste trabalho, apesar de possíveis e/ou necessários paralelos com o escoamento feitos ao longo deste trabalho.

A perda de carga, segundo Baptista e Pinto (2018), pode ser conceituada como a transformação da energia cinética e/ou potencial em calor. Ainda segundo os autores, a perda de carga é classificada em perda de carga contínua, considerada ao longo da tubulação, e perda de carga localizada, devido à presença de conexões. A importância de um correto dimensionamento de perda de carga pode ser percebida nas possíveis perdas financeiras devido à diminuição significativa da quantidade de energia fornecida em função das perdas de carga.

Outra forma de perda avaliada em escoamentos hidráulicos é a chamada perda física que, segundo Da Silva, 2005, “resultam de vazamentos no sistema como um todo que provocam consumos superiores ao estritamente necessário”.

No contexto atual em que estamos inseridos, não apenas em função da relação entre as significativas mudanças climáticas *versus* disponibilidade deste recurso, mas também em razão da importância deste recurso natural para a existência humana, a busca por melhorar a eficiência de sistemas, de uma forma geral, continua sendo um dos principais objetivos de engenheiros projetistas, no qual a máxima “*fazer mais com menos*” é congruente com a perspectiva da necessidade de projetos cada vez mais sustentáveis. Em projetos de engenharia hidráulica, esta eficiência está atrelada ao controle da perda de carga. Dentro desta perspectiva, este trabalho procura apresentar uma revisão temporal sobre

as formulações de perda de carga, selecionando da bibliografia contribuições históricas para a perda de carga e contextualizando, na medida do possível, com a época em que ocorreu, como segue.

4.2 Precusores da Teoria Hidráulica da perda de carga

4.2.1 Daniel Bernoulli

Daniel Bernoulli nasceu em 1700, na Suíça. Uma das mentes mais sagazes de uma família formada por talentosos matemáticos, físicos e filósofos: desde seu pai, Johann I (1667-1748), médico e matemático, até seus sobrinhos, ambos matemáticos, Jacob II Bernoulli (1759-1789) e Johann III Bernoulli (1744-1807).

Segundo Farusawa (2011), Bernoulli e seu pai Johann I, aplicaram as formulações de Newton e de Leibniz para avaliar o fluxo dos fluídos. Ainda segundo o autor, “De Leibniz, utilizou um estudo sobre o princípio da energia, onde relacionava as parcelas de energia potencial e cinética. De Newton, usou a equação de impulso para avaliar separadamente o termo da pressão correspondente”.

Gomes (2010, p.46) diz que, na ciência, são chamadas de leis de conservação “todas aquelas que prescrevem que algo se conserva, ou seja, não pode ser criado nem destruído, e é por isso tido como imutável. Vários fenômenos da natureza podem ser explicados com a aplicação dessas leis”. Ainda segundo o autor, algumas leis clássicas de conservação são: o princípio de conservação da massa de Lavoisier e o princípio de conservação da energia e da quantidade de movimento, que atribui-se a vários autores como Descartes, Leibniz, Newton e outros.

Segundo Baptista e Pinto, (2016, p.49), “[...] a equação de Bernoulli é um caso particular da primeira lei da termodinâmica. Esta lei estabelece que a *mudança de energia interna de um sistema é igual a soma da energia adicionada ao fluido com o trabalho realizado pelo fluido*”.

Uma forma geral e simplificada de expressar esta lei, na dimensão energia/peso, ou simplesmente [L], é:

$$\left(Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \alpha_1 \frac{U_1^2}{2g} \right) - \left(Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \alpha_2 \frac{U_2^2}{2g} \right) = H_m + \Delta h \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{\int v^3 dA}{U^3 A} \quad (2)$$

Onde:

Z = Energia ou carga de posição

$\frac{P}{\gamma} = \text{Energia ou carga de pressão}$

$\frac{\alpha U^2}{2g} = \text{Energia ou carga de velocidade}$

$H_m = \text{Energia aplicada ou retirada por alguma máquina}$

$\Delta h = \text{Perda de energia mecânica ou Perda de carga}$

O fator (α), chamado de coeficiente da energia cinética ou de Coriolis busca quantificar a variação entre a velocidade das partículas (v) e a velocidade média do fluxo (U) dada pela conjuntura das partículas. Dessa forma, Coriolis busca corrigir o cálculo da parcela relativa à energia cinética. Segundo Baptista e Pinto (2016, p.50), “este coeficiente, no caso dos condutos forçados, é igual a 2,0 no escoamento laminar e varia de 1,0 a 1,10 para escoamentos turbulentos. Nos escoamentos livres (alfa) varia de 1,03 a 1,36”. (Baptista e Pinto, 2016; Porto, 2006; Neto, 2018)

Uma forma de interpretar a equação (1) é olhá-la como uma forma de comparar gasto médio de energia para o fluido ser transportado de uma seção 1 de um tubo à seção 2 do mesmo tubo, enquanto um trabalho externo, realizado por uma máquina, como um conjunto motor-bomba, promove ou acrescenta energia ao escoamento, e certas características do sistema provoca perdas de energia mecânica. De fato, cada parcela da equação representa um tipo de energia que se relaciona com o elemento fluido. Do lado esquerdo da equação, quantifica-se o gasto médio de energia devido transporte do fluido, enquanto que o lado direito quantifica o trabalho de agentes externos sobre o sistema e as perdas de energia mecânica própria ao sistema. Consoante Baptista e Pinto (2016, p.49), “a experiência tem demonstrado que, no caso de escoamento dos fluidos reais, uma parte da energia mecânica é despendida em forma de calor e em mudança de energia interna”. A causa desta perda de energia (Δh), está vinculada às resistências existentes ao escoamento (viscosidade, turbulências, atrito externo). (Baptista e Pinto, 2016; Porto, 2006; Neto, 2018).

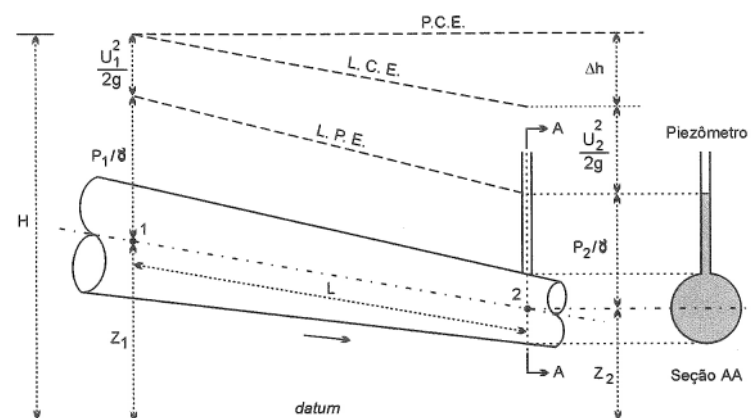
Ainda segundo o autor, “o efeito de uma máquina no sistema, representado pela parcela H_m , deve levar em conta o tipo de máquina. No caso de turbina, que utiliza a energia do sistema o sinal de H_m deve ser positivo, mas no caso de bomba que cede energia ao sistema, o sinal deve ser negativo”. Em problemas práticos da engenharia hidráulica, quando a equação da energia desconsidera a existência de máquinas no sistema, é denominada de equação de Bernoulli.

4.2.1.1 Representação gráfica da equação de Bernoulli

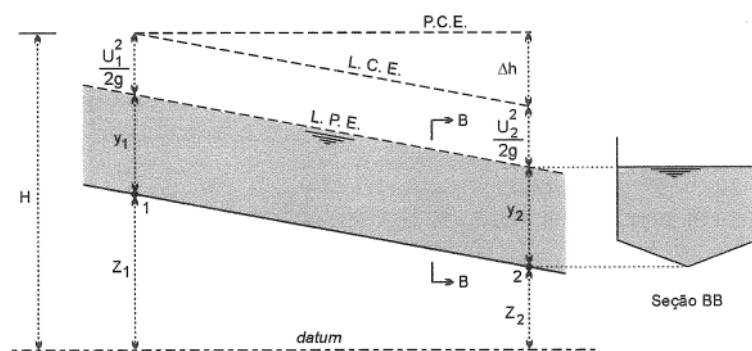
A representação da equação 1, a partir da dimensão linear, pode ser feita graficamente (Figura 5) a partir de um sistema de referência, *datum*, em que: a parcela relativa à carga de pressão (P/γ) é substituída pela lâmina d’água y (nomenclatura usual no escoamento livre (Figura 5b), *em situações*

hidrostáticas; a soma $(Z+P/\gamma)$ é, no gráfico, chamada de linha piezométrica efetiva (L.P.E) e corresponde à energia potencial e quantifica a altura que o líquido atingiria caso, em qualquer ponto da linha, fosse instalado um piezômetro; a parcela $(\alpha U^2/2g)$ corresponde à energia cinética e quantifica o movimento das partículas, com a correspondente correção dado pelo fator alfa; a soma $(Z + P/\gamma + \alpha U^2/2g)$ é, no gráfico, chamado de linha de carga efetiva (L.C.E); e a soma da L.C.E com o ΔH , que representa a perda de energia, representa a energia hidráulica total e graficamente é chamado de plano de carga efetivo (P.C.E). (Baptista e Pinto, 2016).

Figura 5: Representação gráfica da equação de Bernoulli



(a) Conduto forçado



(b) Conduto livre

Fonte: Baptista e Pinto (2016, p.52).

4.2.1.2 Limitações do uso da equação de Bernoulli

Conforme apresentado inicialmente por Daniel Bernoulli, o atrito entre o fluido e um tubo ou canal pode ser quantificado pela equação empírica, equação (1), apropriadamente chamada de equação de energia. Entretanto, diferentes autores apontam vacâncias nesta formulação para situações mais próximas do escoamento real. Lopes (1997), salienta que os pressupostos para a aplicação da equação de Bernoulli não são obtidos na prática, pois, por menores que

sejam, variações de densidade e, conseqüentemente, de compressibilidade do fluido, dependência do tempo nas pressões e velocidades e efeitos de dissipação sempre existem em escoamentos reais. White (2011), diz que “a equação de Bernoulli é muito famosa e bastante usada, mas é necessário estar atento às suas restrições – todos os fluidos são viscosos e, portanto, todos os escoamentos apresentam algum atrito”. Ainda segundo o autor, é necessário restringir o uso da equação de Bernoulli a situações de escoamento com atrito aproximadamente nulo.

Tendo isto em mente, muitos cientistas procuraram desenvolver equações aplicadas a situações mais próximas dos escoamentos reais, conforme tópicos seguintes.

4.2.2 Antoine de Chézy

Antoine de Chézy nasceu em 1718, na França. Estudou na École des Ponts et Chaussées (Academia de pontes e estradas – tradução nossa). Desta escola surgiu outros pesquisadores brilhantes que estão intimamente ligados à teoria hidráulica, incluindo: Gaspard de Prony (1755-1839), Henri de Pitot (1695-1771), Louis Marie Henri Navier (1785-1836), Augustin Louis Cauchy (1789-1857), Jean-Baptiste Bélanger (1790-1874), Gaspard Gustave de Coriolis (1792-1843), Jean Claude Barre de Saint-Venant (1797-1886), Arsene Jules Emile Juvenal Dupuit (1804-1866) e Henry Emili Bazin (1829-1917). (Brown, 2002).

Segundo Farusawa (2011), Chezy foi o primeiro cientista a ampliar e evoluir a ideia de que seria necessária certa energia para o movimento de fluidos sob pressão numa tubulação, através da equação (3) a seguir, que relaciona a perda de carga de forma proporcional à velocidade ao quadrado.

$$V = C\sqrt{R_H \cdot J} \quad (3)$$

Onde:

$V =$ Velocidade (m/s)

$C =$ Constante de Chézy

$R_H =$ Raio hidráulico (m)

$J =$ Perda de carga unitária (m/m)

Ainda segundo o autor, as equações posteriores de perda de carga, em regime turbulento, estão todas relacionadas ao trabalho de Antoine de Chézy.

4.2.3 Gaspard de Prony

Gaspard Clair François Marie Riche de Prony nasceu em 1755, na França, e estudou na École Nationale des Ponts et Chaussées, onde trabalhou como engenheiro.

Gaspard de Prony foi mais uma das grandes mentes que passaram pela École Nationale des Ponts et Chaussées. Segundo Brown (2002), apud Bradley (1998), “Prony foi diretor por muito tempo e Navier foi instrutor, então podemos ter certeza de que os estudantes aprenderam o estado da arte do escoamento de fluidos” (tradução nossa).

Além disso, Prony fora aluno de Chézy e tornou público o trabalho realizado por Chézy que estava perdido até 1800. (Madeira, 2006)

Segundo Brown (2002), “a relação mais aceita para a resistência ao fluxo foi a proposta por Prony”, conforme equação (4) a seguir.

$$h_L = \frac{L}{D}(aV + bV^2) \quad (4)$$

Onde:

D = Diâmetro da tubulação (m)

a e b = Coeficientes empíricos de atrito

V = Velocidade (m/s)

h_L = Perda de carga

Ainda segundo o autor, a equação de Prony estava sujeita a erros, uma vez que as recomendações para os valores dos coeficientes levavam em consideração a rugosidade do tubo. O trabalho consultado não forneceu dimensões das variáveis que foram especificadas conforme significado óbvio(tradução nossa).

4.2.4 Julius Weisbach

Julius Ludwig Weisbach nasceu em 1806, na Alemanha. Estudou mineralogia, geologia, matemática, física e engenharia mecânica. Entretanto, ganhou mais notoriedade por seus trabalhos na área de mineração e engenharia de mineração. (Encyclopedia.com).

A equação de Darcy-Weisbach, conforme mencionada no próximo tópico, conhecida como fórmula universal, é uma contribuição mútua entre os dois cientistas: Henry Darcy e Julius Weisbach.

4.2.5 Henry Darcy

Henry Philibert Gaspard Darcy nasceu em 10 de Junho de 1803, na França, onde estudou na School of Bridges and Roads e recebeu a graduação de engenheiro civil, em 1826. Henry Darcy desenvolveu diversas pesquisas e descobertas, a mais notável pode ter sido o desenvolvimento da expressão matemática que descreve o movimento da água através de areias, a chamada lei de Darcy, que é amplamente utilizada nos dias de hoje, não apenas na hidrogeologia, mas também na engenharia mecânica e geotécnica. (Encyclopedia Britannica virtual).

Uma mente brilhante que projetou um eficiente sistema público de abastecimento de água para sua cidade natal, Dijon, composto por: Sistema de captação, aqueduto subterrâneo de 12 quilômetros, dois reservatórios, tubulações de distribuição e 142 fontes de água distribuídas na cidade. (Ritzi Jr. e Bobeck, 2008).

Este projeto foi por ele mesmo detalhado na publicação “The Public of the City of Dijon”, em 1858, dois anos antes de seu falecimento. Nesta publicação, Henry Darcy também apresentou os resultados de seus experimentos com colunas de areia e fluxo de água em tubulações. Do experimento com tubulações resultaria, anos mais tarde, no modelo Darcy-Weisbach, que quantifica a resistência ao fluxo através de uma tubulação. (Ritzi Jr. e Bobeck, 2008).

Segundo Furusawa (2011), “em 1845, Júlio Weisbach e Henry Darcy Desenvolveram uma fórmula mais geral sobre a perda de carga em tubulações, a qual é uma extensão do trabalho de Chézy”. A fórmula, equação 5, também chamada de fórmula universal, ainda é considerada a fórmula teoricamente mais correta para a perda de carga em tubulações.

$$h_f = f \left(\frac{LV^2}{2gD} \right) \quad (5)$$

Onde:

h_f = perda de carga (m)

f = Coeficiente de atrito [-]

L = Comprimento da tubulação (m)

V = Velocidade (m/s)

g = aceleração gravitacional (m/s²)

D = Diâmetro da tubulação (m)

O coeficiente de atrito f varia em função de dois valores (α e β) que estão atrelados ao diâmetro e ao material da tubulação, além da velocidade média do escoamento, conforme equação 6) abaixo. Esta equação foi, segundo Furusawa (2011), “baseada em um conjunto de dados relativamente pequeno. Weisbach relatou 11 de seus próprios experimentos, enquanto 51 medições foram tomadas a partir de outros relatórios”. Os relatórios foram os de Claude Couplet, Bossut Charles, Pierre Du Buat, Gaspard Riche de Prony e Eytelwein Johann. (Furusawa, 2011).

$$f = \alpha + \left(\frac{\beta}{\sqrt{V}}\right) \quad (6)$$

4.2.6 Maurice Lévy

Maurice Lévy (28 de fevereiro de 1838 - 30 de setembro de 1910), foi um matemático, físico e engenheiro francês da École Nationale des Ponts et Chaussées, e desenvolveu importantes trabalhos para as áreas de hidrodinâmica, hidráulica, estática, termodinâmica, cinemática e geometria diferencial. (Encyclopedia.com).

$$U = \alpha \sqrt{\frac{D}{2} \left(1 + \beta \sqrt{\frac{D}{2}}\right) J} \quad (7)$$

Onde:

J = perda de carga unitária (m/m)

U = Velocidade (m/s)

D = Diâmetro (m)

α e β = coeficientes de perda de carga

Esta equação foi aprimorada com a contribuição de H. Vallot, originando uma fórmula equivalente chamada de fórmula de Levy-Vallot (MALTA, 1942).

4.2.7 Robert Manning

Robert Manning (22 de outubro 1816 – 9 de dezembro 1897) foi um engenheiro hidráulico Irlandês. Para formular o modelo matemático para a perda de carga, Manning avaliou sete fórmulas mais conhecidas de sua época para o fluxo de água em canal: Du Buat (1786), Eytelwein (1814), Weisbach (1845), St. Venant (1851), Neville (1860), Darcy e Bazin (1865) e Ganguillet e Kutter (1869). (Enciclopédia virtual livre).

Após ajustes em sua formulação, em 1889, Manning propôs sua fórmula ao Instituto de Engenheiros Cívicos da Irlanda. Após um artigo escrito por ele, publicado na Transactions of the Institution of Civil Engineers, a equação ganhou notoriedade acadêmica. (Enciclopédia virtual livre).

$$h_f = 6,36 \frac{n^2 V^2}{D^{1,33}} L \quad (8)$$

Onde:

$h_f = \text{perda de carga contínua (m)}$

$V = \text{Velocidade média do escoamento (m/s)}$

$D = \text{Diâmetro interno do tubo (m)}$

$n = \text{coeficiente de manning}$

Segundo Gomes (1997), *apud* Neto *et al* (2016), “a equação de Manning aplica-se a todo tipo de conduto, tanto nos que a água escoar em lâmina livre, como nos escoamentos sob pressão”. A equação 8 acima é recomendado para o caso de tubulações.

4.2.8 Hazen-Williams

Uma das críticas feitas ao modelo Darcy-Weisbach é a dificuldade na determinação do coeficiente de atrito. Em função disto, em 1906, Alan Hazen (1869 – 1930) e Garder S. Williams (1866 – 1931) desenvolveram uma equação empírica para a perda de carga, no regime de escoamento turbulento rugoso, adotando um coeficiente C, chamado de coeficiente de rugosidade de Hazen-Williams, em vez do uso de um fator de atrito. (SILVA, 2017).

Esta fórmula, equação 8, foi desenvolvida a partir de um minucioso trabalho que considerou milhares de dados experimentais e cuidadoso exame estatístico. (Portal Tolentino).

$$J = 10,643 Q^{1,85} C^{-1,85} D^{-4,87} \quad (9)$$

Onde:

$J = \text{perda de carga unitária (m/m)}$

$Q = \text{Vazão (m}^3/\text{s)}$

$C = \text{Coeficiente de rugosidade de Hazen – Williams}$

$D = \text{Diâmetro (m)}$

Segundo Silva (2017), o valor do coeficiente de rugosidade de Hazen-Williams (C) é determinado por tabelas que dependem do material e tempo de uso da tubulação.

4.2.9 Fair-Whipple-Hsiao

Em projetos de instalações hidrossanitários, cuja característica peculiar é a presença de trechos curtos de tubulações, variação de diâmetros menores que 100 mm e presença de dispositivos de conexão e controle de fluxo, é muito usual a utilização da formulação empírica para o cálculo da perda de carga proposta por Fair-Whipple-Hsiao. (Porto, 2006).

Consoante Baptista e Pinto (2018), para a perda de carga contínua, a NBR5626/1998 recomenda a utilização das expressões universal ou Fair Whipple-Hsiao (1930) para tubos de aço, cobre ou plástico.

$$\Delta h' = 0,002021 \frac{Q^{1,88}}{D^{4,88}} L \quad (2)$$

{*Para tubos rugosos de aço – carbono*}

$$\Delta h' = 0,000859 \frac{Q^{1,75}}{D^{4,75}} L \quad (3)$$

{*Para tubos lisos poliméricos, cobre ou liga de cobre*}

$$\Delta h' = 0,000692 \frac{Q^{1,75}}{D^{4,75}} L \quad (4)$$

L {*Para tubos de cobre ou latão*}

Onde:

$\Delta h'$ = perda de carga contínua (m)

Q = Vazão (m³/s)

L = Comprimento do conduto (m)

D = Diâmetro do conduto (m)

Ainda segundo o autor, ainda não há fórmula específica pra tubos de aço galvanizado, conduzindo água quente. Porém, a fórmula, para tubos rugosos de aço-carbono, tem sido empregada nesses casos, uma vez que apresenta resultados a favor da segurança.

4.2.10 Fred Charles Scobey

Fred Charles Scobey (1880 – 1962) foi um engenheiro americano que desenvolveu importantes trabalhos sobre perdas de carga em canais de irrigação, condutos de madeira, aço e concreto, cujas expressões até hoje gozam de grande reputação. (Netsaber Biografias).

Duas publicações de Scobey ganharam bastante notoriedade acadêmica: “Permissible Canal Velocities” Transactions of the America Society of Civil Engineers. Vol. 89, 1926. e The flow of water in commercially smooth pipes, Water Resources Center Archives, Univ. of California, Berkeley, 1966. Esta última apresentou a formulação de Scobey para a perda de carga em tubulações. Segundo Tavares *et al* (2016), a equação é dada pela seguinte expressão:

$$h_f = \frac{Ks}{387} \frac{1}{D^{1,1}} V^{1,9} L \quad (5)$$

Onde:

h_f = perda de carga contínua na tubulação (m)

D = Diâmetro da tubulação (m)

V = velocidade média do escoamento (ms^{-1})

L = Comprimento do tubo (m)

Ks = Coeficiente de Scobey

Segundo Gomes (1997), *apud* Neto *et al* (2016), a equação é indicada para o cálculo de perda de carga em projetos de sistema de irrigação por aspersão e por gotejamento.

4.2.11 Outras contribuições

Entre os anos de 1700 a 1900, diversos ensaios e trabalhos foram realizados por diferentes pesquisadores e em diferentes locais do mundo. Muitos publicados em revistas acadêmicas e jornais da época.

Azevedo Neto (1998) cita que o enorme acervo de modelos matemáticos existentes para o cálculo de perda de carga em canalizações impressiona e põe em dúvida aqueles que se iniciam nesse setor da hidráulica aplicada. Ainda conforme o autor, desde a formulação apresentada por Chézy (1775), outras expressões foram propostas para o mesmo fim.

O autor ainda lista 40 fórmulas considerada por ele como as principais, conforme quadro a seguir.

Quadro 2: Principais autores que formularam hipóteses para perda de carga.

	Ano	Autor	País		Ano	Autor	País
1	1775	Chézy	FR	21	1877	Fanning	USA
2	1779	Dubuat	FR	22	1877	Hamilton Smith	USA
3	1791	Woltmann	DE	23	1878	Colombo	FR
4	1796	Eytekweub	DE	24	1878	Darrach	USA
5	1800	Coulomb	FR	25	1880	Ehrmann	DE
6	1802	Eisenmann	DE	26	1880	Iben	DE
7	1804	Prony	FR	27	1881	Franck	DE
8	1825	D'Aubuisson	FR	28	1883	Reynolds	GB
9	1828	Tadini	IT	29	1884	Thrupp	GB
10	1845	Weisbach	DE	30	1886	Unwin	USA
11	1851	Saint Venant	FR	31	1887	Stearbs-Brusch	USA
12	1854	Hagen	DE	32	1889	Geslain	FR
13	1855	Dupuit	FR	33	1889	Tutton	GB

Continua

Quadro 3: Principais autores que formularam hipóteses para perda de carga.

14	1855	Leslie	GB	34	1890	Manning	IE
15	1855	Darcy	FR	35	1892	Flamant	FR
16	1867	Ganguillet-Kutter	CH	36	1896	Lang	DE
17	1867	Levy	FR	37	1898	Fornié	FR
18	1868	Bresse	FR	38	1902	Hiram-Mills	USA
19	1868	Gauckler	FR	39	1903	Christen	USA
20	1873	Lampe	DE	40	1903	Hazen-Williams	USA

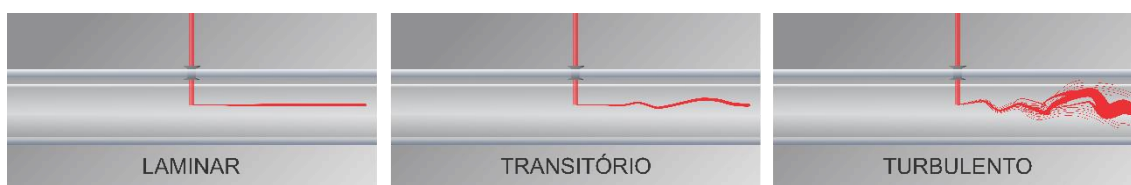
Fonte: Neto, 2018.

4.3 Fator de atrito e a classificação dos escoamentos

Para um perfeito entendimento deste tópico, é necessário ter em mente que no século XIX ocorreu importantes avanços para a mecânica dos fluidos. Diversos cientistas, além dos citados neste trabalho, promoveram importantes avanços para a compreensão do escoamento dos fluidos. Dentre estes está Osborne Reynolds (1842-1912), que formulou uma lei para o escoamento de fluido viscoso e permitiu classificar o escoamento em: laminar, transição e turbulento, e Ludwig Prandtl (1875-1953) que, junto a um grupo de orientandos, forneceu uma forma de previsão para o fator de atrito baseando-se em um novo conceito: o conceito da camada limite de Prandtl.

A experiência de Osborn Reynolds (1883) consistiu na utilização de um tipo de corante despejado sobre um fluido em movimento para a formação de um filete visível, que permitiu estudar o escoamento. Este experimento permitiu visualizar dois tipos de fluxos que classifica o escoamento em: laminar e turbulento. No escoamento laminar, o filete formado apresentou-se bem definido e sem perturbações com o líquido, justificando que as várias camadas do líquido em movimento também se comportavam sem perturbação. Já no escoamento turbulento, o filamento formado apresentou trajetórias irregulares, ocorrendo uma mistura do corante na massa líquida. (Baptista e Pinto, 2014).

Figura 6 : Escoamento laminar, transitório e turbulento.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor. 2021.

Segundo Porto (2006, p.3), no escoamento laminar, prepondera a ação da viscosidade do fluido atenuando a tendência de surgimento da turbulência e este escoamento geralmente ocorre em baixas velocidades ou em fluidos muito viscosos.

Ainda segundo o autor, no escoamento turbulento, “as partículas do líquido movem-se em trajetórias irregulares, com movimento aleatório, produzindo uma transferência de quantidade de movimento entre regiões da massa líquida”.

Os números de Reynolds correspondentes aos regimes de escoamentos verificados na experiência citada, bem como a equação considerando as indicações de Reynolds, são:

$$Re = \frac{\rho U D_h}{\mu} \quad (6)$$

Onde:

Re = número de Reynolds

ρ = massa específica

U = velocidade média do escoamento

D_h = dimensão geométrica característica

μ = viscosidade dinâmica

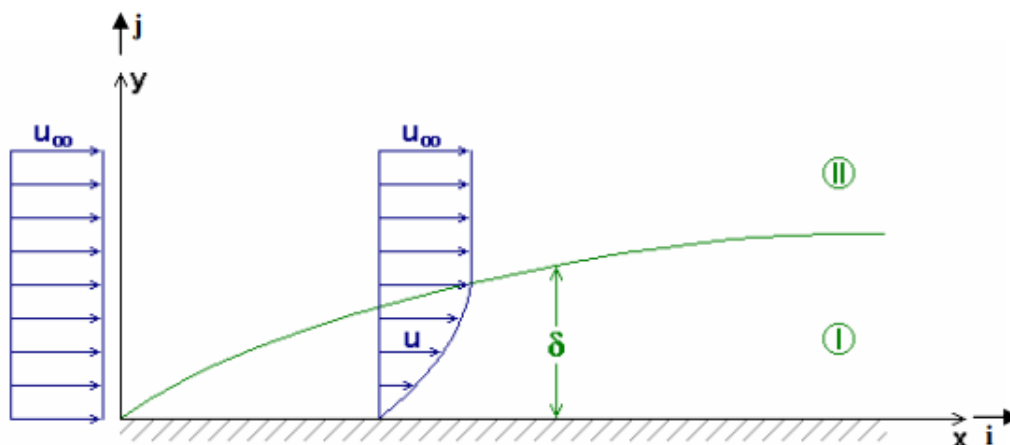
Tabela 1: Regimes de escoamento e número de Reynolds

Regime	Conduto Livre	Conduto Forçados
Laminar	$Re < 500$	$Re < 2000$
Transição	$500 < Re < 1000$	$2000 < Re < 4000$
Turbulento	$Re > 1000$	$Re > 4000$

Ao final do século XIX, os dados dos estudos na área da mecânica dos fluidos apresentavam resultados conflitantes em função de duas correntes de abordagens distintas: a teórica, representada pelos trabalhos de Daniel Bernoulli (1700-1782), e a experimental, representada por um conjunto de trabalhos, em especial os publicados pela escola Francesa. Este cenário conflitante levou Ludwig Prandtl a analisar o escoamento sobre um corpo sólido a partir da divisão do escoamento em duas regiões onde a diferença fundamental fosse a influência da viscosidade. Este conceito, introduzido por Ludwig Prandtl, em 1904, juntamente com seus orientados: Thedor von Karmen; Johan Nikuradse; Henrich Blasius e Thomas Stanton, permitiu que equações fossem validadas em função das características apresentadas pelas regiões definidas pela camada limite de Prandtl. (Freire, 1990; Passos, 2010; Freire, 2012).

Consoante Passos (2010), “as observações experimentais mostram que quando um fluido escoar, paralelamente a uma superfície, as partículas do fluido em contato com a superfície aderem a esta. É como se a viscosidade tivesse o efeito de uma cola”. Em função disto, um escoamento de um fluido apresenta um perfil de velocidade, variando de uma velocidade próxima a zero para as partículas próximas da superfície até uma região em que a variação da velocidade é quase uniforme (Figura 7).

Figura 7: Esquema do perfil de velocidade sobre placa plana, na camada limite laminar, regiões I e II.



Fonte: Passos (2010).

Um líquido escoando sobre uma superfície sólida tem a superfície imediatamente em contato com a superfície aderida à mesma. Em função desta força de aderência, a velocidade irá variar desde um valor nulo na camada líquida imediatamente em contato com a superfície até um valor no qual esta condição de aderência não é mais sentida. Além disso, quando a viscosidade for baixa, o gradiente de velocidade formado, de zero para o valor máximo atingível, ocorrerá numa região estreita. É nesta faixa que as forças de atrito ganham relevância, pois atuam retardando a velocidade de escoamento. A esta faixa dá-se o nome de camada limite. (Freire, 1990. Baptista e Pinto, 2016).

A explicação deste fenômeno foi realizada por Ludwig Prandtl, a partir da teoria da *Camada limite*. Segundo Baptista e Pinto (2016), “esta teoria serviu para explicar por quê as leis da Física, quando aplicadas ao escoamento dos fluidos, apresentavam bons resultados somente fora da camada limite”.

Segundo Lacerda e Amorim (2001), a forma analítica da distribuição de velocidade, figura 7, é desconhecida e, por esta razão, são utilizadas algumas expressões aproximadas nos livros-textos, que são aplicadas junto a condições de contorno do problema. O autor ainda faz uma ressalva quanto ao procedimento adotado pelos livros-textos que, ainda que muito utilizado

didaticamente, “... o aluno perde a correlação existente entre coeficientes de seu modelo matemático com as condições de contorno do problema” O autor ainda apresenta e discute resultados obtidos para o perfil de velocidade utilizando diferentes metodologias. Já Passos (2010), apresenta algumas falhas em resultados demonstrativos da camada limite apresentados por Incropera e DeWitt (1996), Incropera et DeWitt (2008) e Çengel (2009), sendo a principal falha, apontada pelo autor, a escolha da velocidade e do comprimento da placa como escalas características para as velocidades adimensionais e as distâncias.

Conforme tópicos seguintes, após o conceito da camada limite, alguns cientistas, boa parte destes orientados da pesquisa da camada limite de Ludwig Prandtl, procuraram fornecer maneiras mais eficientes de determinar a resistência ao escoamento de Darcy-Weisbach (f), correlacionando-a com o número de Reynolds (Re).

4.3.1 Hagen-Poiseuille

Consoante Porto (2006), a fórmula de Hagen-Poiseuille foi obtida experimentalmente em 1839 por Hagen e, um ano mais tarde, teoricamente por Poiseuille.

$$J = \frac{32\nu U}{gD^2} \quad (7)$$

Onde:

J = perda de carga unitária

ν = viscosidade cinemática do fluido

U = velocidade média do escoamento

g = atração gravitacional

D = diâmetro da tubulação

Ainda segundo o autor, esta fórmula correlaciona o número de Reynolds com o fator de atrito e mostra que, no escoamento laminar, para $Re \leq 2300$, o fator de atrito só depende do número de Reynolds, ou seja, independe da rugosidade da tubulação, como segue:

$$\frac{32\nu U}{gD^2} = f \frac{U^2}{2gD} \text{ (Darcy - Weisbach)} \Rightarrow f = \frac{64}{Re}$$

4.3.2 Heinrich Blasius

Paul Richard Heinrich Blasius nasceu em 1883, na Alemanha, e foi um engenheiro hidráulico, físico e cientista.

Consoante Hager (2003), Heinrich Blasius foi um dos primeiros alunos de Prandtl a fornecer não apenas uma base matemática para o conceito da camada limite, mas também evidenciar a dependência da resistência ao fluxo de Darcy-Weisbach (f) através de tubos lisos em termos do número de Reynolds para os fluxos transitórios e turbulentos, através da publicação em 1913 (equação 16), válida para o intervalo de $3 \times 10^3 < Re < 10^5$:

$$f = \frac{0.3164}{Re^{1/4}} \quad (8)$$

Onde:

f = coeficiente de atrito

Re = Número de Reynolds

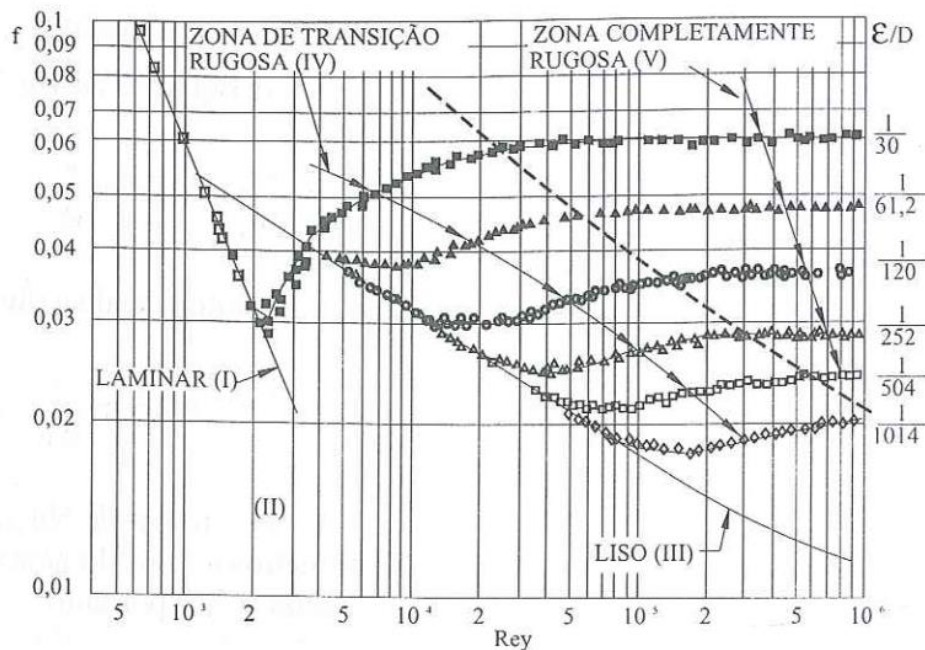
4.3.3 Johan Nikuradse

Johan Nikuradse, em 1932 e 1933, apresentou dados experimentais relacionando os dois parâmetros (atrito de Darcy-Weisbach e número de Reynolds) e incluiu o efeito da rugosidade limite, apresentado por Vón Kármán (1921). (Ettema, 2006).

Consoante Porto (2006), os experimentos realizados por Nikuradse procuraram determinar o fator de atrito em tubulações circulares. Nestes experimentos, tubos lisos foram revestidos internamente com grãos de areia, de granulometria controlada, a fim de criar diferentes cenários de rugosidade (uniforme e artificial). Dessa forma, foram relacionados: fator de atrito Darcy-Weisbach (f), o número de Reynolds (Re) e a rugosidade relativa artificial, $(\frac{\epsilon}{D})$.

Ainda conforme o autor, os resultados obtidos permitem uma análise fenomenológica de cinco regiões, conforme apresentação, a seguir, e podem ser observadas em um gráfico, chamado de Harpa de Nikuradse, Figura 8.

Figura 8: Harpa de Nikuradse



Fonte: Porto, 2006.

- “Região I – $Re < 2300$, escoamento laminar, o efeito de atrito independe da rugosidade, devido ao efeito da subcamada limite laminar e vale $f = \frac{64}{Re}$ ”.
- “Região II – $2300 < Re < 4000$, região crítica onde o valor de f não fica caracterizado”.
- “Região III – Curva dos tubos hidráulicamente lisos, influência da subcamada limite laminar, o fator de atrito só depende do número de Reynolds. Escoamento turbulento hidráulicamente liso”.
- “Região IV – transição entre o escoamento turbulento hidráulicamente liso e rugoso, o fator de atrito depende simultaneamente da rugosidade relativa e do número de Reynolds”.
- “Região V – turbulência completa, escoamento hidráulicamente rugoso, o fator de atrito só depende da rugosidade relativa e independe do número de Reynolds”.

Segundo Baptista e Pinto (2018), Nikuradse, através das experiências realizadas em tubos, conforme mencionada anteriormente, obteve para tubos lisos a seguinte expressão:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \log \frac{Re\sqrt{f}}{2,51} \quad (17)$$

Onde:

f = Coeficiente de atrito

Re = Número de Reynolds

4.3.4 Cyril Colebrook e Cedric White

Consoante Furusawa (2011), Cyril Colebrook e Cedric White, em 1938, avaliaram e mostraram que para os tubos industriais com rugosidade não-uniformes, as curvas de transição apresentadas por Nikuradse em seus experimentos não eram validadas. Dessa forma, os dois pesquisadores propuseram uma nova equação empírica, conforme apresentado a seguir.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left| \frac{\varepsilon}{3,7D} + \frac{2,51}{Re\sqrt{f}} \right| \quad (18)$$

Onde:

f = Coeficiente de atrito

Re = Número de Reynolds

ε = Espessura ou altura da rugosidade da tubulação (m)

D = Diâmetro da tubulação (m)

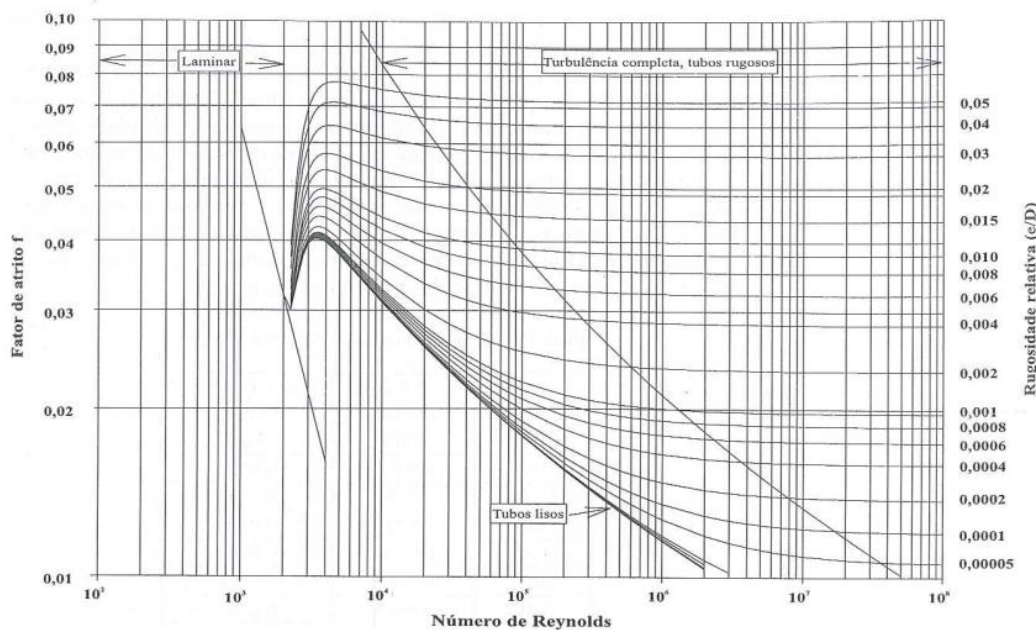
A formulação proposta por Colebrook e White é particularmente indicada para a faixa de transição entre os escoamentos turbulentos liso e rugoso e dentro do intervalo de $14,14 < \frac{Re\sqrt{f}}{D/\varepsilon} < 198$. (Porto, 2006).

4.3.5 Lewis Moody

Em 1944, o trabalho realizado por Colebrook-White foi estendido para um gráfico, na forma do diagrama de Stanton, Figura 9, que apresenta os eixos coordenados em gradação logarítmica, com o fator de atrito (f) em ordenadas e o número de Reynolds em abscissas, para vários valores de rugosidade relativa. (Porto, 2006).

Este trabalho foi realizado por Lewis Ferry Moody, engenheiro americano.

Figura 9: Diagrama de Moody



Fonte: Porto, 2006.

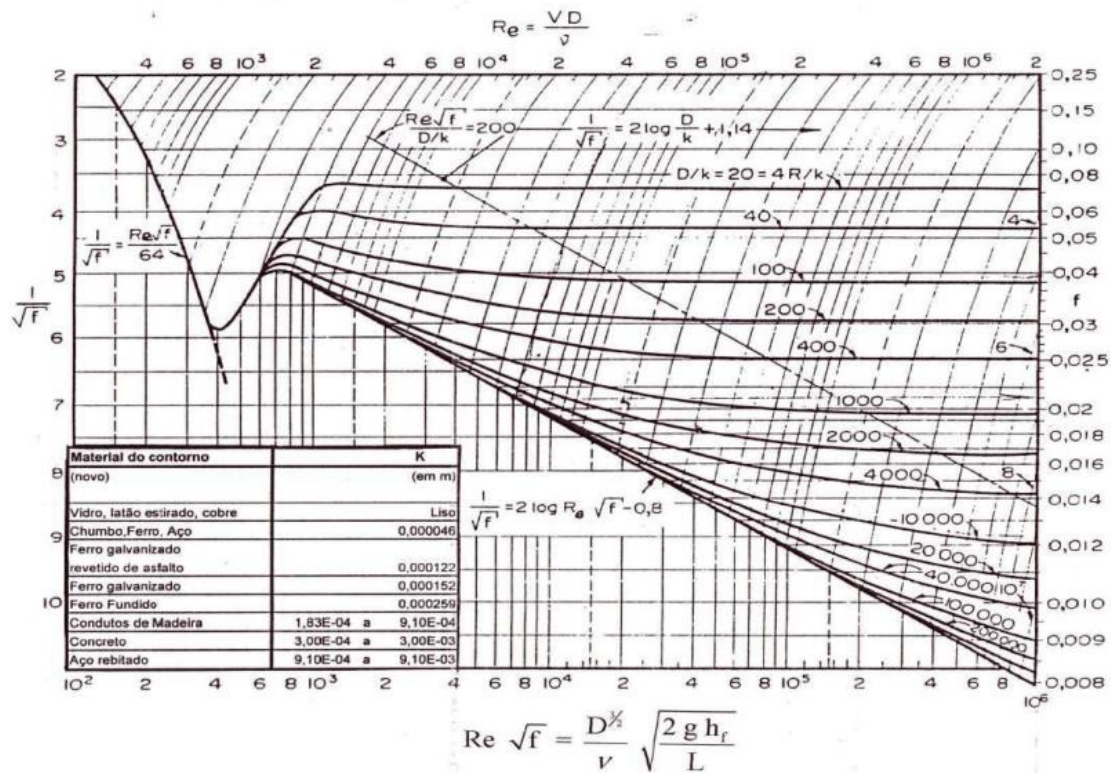
4.3.6 Hunter Rouse

Uma outra extensão do trabalho de Colebrook-White foi proposta por Hunter Rouse (1906-1996). Em 1942, Rouse apresentou um artigo "Evaluation of Boundary Roughness", que continha um diagrama de resistência incorporando os conceitos propostos na formulação de Colebrook-White e Prandtl.

Segundo Furusawa (2011), é possível observar que é mais conveniente utilizar o diagrama de Moody para encontrar o valor de h_f conhecendo os valores de Q e D . Entretanto, o diagrama de Rouse permite uma solução direta, não-iterativa do valor da vazão conhecendo os valores de h_f e D .

No diagrama de Rouse, Figura 10, o eixo da ordenada é plotado em função de $(1/\sqrt{f})$, enquanto que o eixo da abscissa em função do produto $(Re\sqrt{f})$. As equações apresentadas por Prandtl e Von Kármán foram plotadas para diferentes valores de rugosidade.

Figura 10: Diagrama de Rouse.



Fonte: Porto, 2006.

4.3.7 Swamee-Jain

Uma das dificuldades encontradas na utilização da equação proposta por Colebrook-White está em explicitar o valor do coeficiente de rugosidade. Diante desta dificuldade, têm sido apresentadas na literatura algumas fórmulas explícitas e aproximadas para a determinação do fator de atrito. (Porto, 2006).

$$f = \frac{0,25}{\left[\log \left(\frac{\varepsilon}{3,7D} + \frac{5,74}{R_e^{0,9}} \right) \right]^2} \quad (19)$$

Válida para $(10^{-6} \leq \frac{\varepsilon}{D} \leq 10^{-2} \text{ e } 5 \cdot 10^3 \leq Re \leq 10^8)$.

4.4 Formulações teóricas e aplicações hidráulicas.

Ao longo da história datada, a relação entre o ser humano e a água passou por muitas e diferentes transformações. Dentro desta perspectiva, vários cientistas e pesquisadores contribuíram de diferentes formas com o desenvolvimento de métodos que, de uma forma geral, foram propostos a fim de atingir níveis cada vez mais eficientes.

Um dos desafios enfrentados pela teoria hidráulica esteve associado a busca pela redução das perdas em tubulações, ora em tubulação abertas ora em tubulações fechadas, e nos dias atuais, há um vasto acervo de aplicações que utilizam de alguma metodologia matemática associada à busca por reduzir este tipo de perda, tais como: sistemas hidrossanitários residenciais, redes e adutoras de água, líquidos biomédicos, sistemas de irrigação e fabricação de tubos de diferentes materiais.

A equação de Bernoulli (1738) é utilizada em diferentes aplicações. Heneine (2000) utiliza a equação de Bernoulli para avaliar a energia do fluxo em vasos sanguíneos. Ibars (2004) apud Denícule (1990) destaca o uso do teorema de Bernoulli na confecção de bocais, diafragmas e medidores de Venturi. Leal *et al* (2017) utilizou o modelo de Bernoulli para comparação de velocidades da projeção do jato em bocais, como podem ser vistos em mangueiras de incêndio e equipamentos de airsoft.

A equação de Chézy (1775) foi citada no trabalho de Rosenhagen (2013), onde é utilizado o coeficiente de Chézy durante aplicação de uma fórmula de transporte de sedimentos considerando ondas e correntes em um modelo hidrosedimentológico. Já no trabalho de Costa e Dias (2017), a fórmula de Chézy é combinada com a de Manning para a determinação da vazão em canais hidráulicos de diferentes seções.

A equação empírica de Prony (1804) foi amplamente utilizada na época de sua publicação. Porém, na hidráulica moderna esta equação foi perdendo importância e foi sendo substituída pela equação Darcy-Weisbach. (Madeira, 2006; Enciclopédia livre).

A fórmula universal, Darcy-Weisbach (1845) é amplamente utilizada em diferentes aplicações. Furusawa (2011), utilizou da fórmula universal para propor um método de dimensionamento otimizado de rede de abastecimento de água em malhas. Simões *et al* (2014), cita a utilização da fórmula universal para elaboração de projetos de condutos forçados, vertedores e canais com o fundo em degraus. Esta fórmula também é indicada no programa de modelagem computacional EPANET e pela norma brasileira NBR 12218/94 – projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público.

A equação de Lévy, seja na sua primeira versão ou seja na versão equivalente, equação Levy-Malta, é citada em dois boletins da repartição de águas e esgotos de São Paulo, no qual a equação é utilizada para dimensionamento de redes e adutoras de água. (MALTA, 1942).

A fórmula de Manning (1889) também é utilizada em diferentes aplicações da engenharia. Neto et al (2016) cita o comportamento das equações Manning quando utilizadas para a estimativa da perda de carga em tubos com comportamento elástico. A fórmula de Manning também é utilizada em condutos livres, conforme pode ser visto no trabalho de Grison *et al* (2013) que avaliou a resistência ao fluxo d'água em um canal de fluvial a partir do coeficiente de rugosidade presente na fórmula de Manning.

A equação de Hazen-Williams (1902) é amplamente utilizada em diversas aplicações devido, principalmente, por sua simplicidade de uso. Sampaio et al (2007) avaliou a perda de carga em tubulações comerciais de aço zincado, ferro galvanizado e PVC, com diferentes diâmetros, com o intuito de adaptar ou corrigir a equação para aplicá-la em escoamentos de água residuária proveniente da suinocultura. Galdino *et al* (2018) utilizou da equação aplicada ao dimensionamento hidráulico de hidrantes. A aplicação da perda de carga de tubulações a partir de Hazen-Williams pode ser observada no trabalho de De Araújo *et al* (2020) que utilizou a equação de Hazen-Williams na comparação das perdas de carga em tubulações de aço patinável e PVC DeFoFo com diâmetros de 200 mm e 350mm. Esta equação também é utilizada pelo software EPANET que é amplamente utilizado em projetos de dimensionamento de redes de distribuição e adutoras de água, bem como, tem grande aderência em projetos de irrigação, como visto no trabalho de Carvalho *et al* (2009), que determinou a perda de carga distribuída e a variação dos coeficientes de atrito da equação de Hazen-Williams em tubulações comerciais de PVC, conduzindo águas residuárias do processamento do café.

A equação de Fair-Whipple-Hsiao (1930) é utilizada em diferentes aplicações. Cenci *et al* (2016) a utiliza para avaliar a perda de carga em tubulações de PVC. Kapp (2018) utilizou da equação para avaliar a perda de carga em aquecedores de passagem do tipo serpentina. Além desses trabalhos, a NBR 5626/1998 recomenda esta equação para avaliar a perda de carga contínua em canalizações de água fria em PVC em projetos de instalações prediais de água fria.

A equação de Scobey (1966) é citada no trabalho de Gomes (1997) apud Neto et al (2016), em que se indica a aplicação desta equação para o cálculo de perdas de carga nas tubulações leves, utilizadas em sistemas de irrigação por aspersão, e por gotejamento. Lisiuk *et al* (2007) utiliza da equação de Scobey para o cálculo da perda de carga em um sistema de irrigação de pivô central. Sampaio *et al* (2010) avalia a perda de carga em laboratório para tubulações com diâmetros entre 32 e 75 mm em PVC e ferro galvanizado a partir da equação de Scobey e compara com outras formulações.

5.0 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A evolução da teoria hidráulica contempla vários pesquisadores e cientistas, cada um utilizando os recursos disponíveis da época para resolver problemas específicos e, dessa forma, contribuir com o crescimento do domínio humano sobre este recurso natural. Neste conjunto estão inseridos tanto pesquisadores experimentais quanto teóricos que, mesmo em momentos diferentes, permitiram aos seus sucessores significativas fundamentações que serviriam de suporte para novas descobertas e conseqüente ampliação do conhecimento humano a respeito da dinâmica do escoamento dos fluidos.

Iniciando com pensamentos científicos gregos através dos escritos de Arquimedes, passando pela chamada escola experimental Italiana lideradas por Leonard da Vinca, adquirindo aperfeiçoamentos teóricos propostos por Bernoulli que se apoiou em teorias matemáticas e físicas, tais como as de Newton, Descartes, Pascal, Boyle e Leibniz e, ganhando, seguidamente, cada vez mais eficiência a partir de diferentes trabalhos e pesquisas hidráulicas, a evolução da teoria hidráulica ocorreu devido uma contribuição temporal longa e contínua e envolveu um vasto conjunto de pesquisadores que, mesmo com certas limitações e dificuldades, proporcionaram esta evolução.

Dentro da perspectiva hidráulica da perda de carga em tubulações sob pressão, um subconjunto de pesquisadores, alguns teóricos e outros experimentais, pode ser formado. O primeiro destes pesquisadores foi Daniel Bernoulli (1700 – 1782), considerado pesquisador teórico com contribuições que se destacam por seu cunho matemático e físico. Dessa forma, à luz da teoria de Newton e Leibniz, e de matemáticos teóricos da época, Bernoulli foi capaz de avaliar teoricamente o fluxo hidráulico, dando origem a uma formulação que serviria de base para outros pesquisadores e que ainda é utilizada nos dias atuais em projetos como: avaliação da energia do fluxo em vasos sanguíneos; Projetos de confecção de bocais, diafragmas e medidores de Venturi. Entretanto, por ser um modelo fundamentado em teorias matemáticas, não conseguiu se aproximar de forma muito eficiente da realidade física e, dessa forma, deixou uma lacuna entre o modelo teórico e a realidade física do fenômeno da perda de carga. Esta lacuna viria a ser posteriormente preenchida pelos trabalhos de outros cientistas.

O segundo pesquisador, Antonie de Chézy (1718 – 1798), foi o pioneiro de uma série de pesquisadores teóricos e experimentais integrantes da École des Ponts et Chaussées, França. É necessário reconhecer a importância desta escola para a evolução dos modelos de previsão de perda de carga devido ao número de pesquisadores e cientistas, provenientes da escola, que forneceram com importantes modelos, teóricos e experimentais, em especial relacionados com a busca pela determinação do coeficiente da perda de carga de forma teórica e experimental e procurando, desta forma, preencher a lacuna existente no modelo proposto por Bernoulli.

Na sequência, inicialmente Chézy fundamenta-se no conceito de perda de energia proposta por Bernoulli e demais teorias matemáticas associadas ao modelo pré-existente. Chézy aprimora o conceito de perda de carga, introduzindo o coeficiente de Chézy. Posteriormente, outros pesquisadores apoiam-se na fundamentação de Chézy para propor novos modelos que procurariam estimar os coeficientes de perda de carga a partir da realização de vastos experimentos. O primeiro destes pesquisadores fora o aluno de Chézy, Gaspard de Prony (1755 – 1839) que em sua formulação considerou coeficientes de perda de carga empíricos. Em seguida, os pesquisadores Julius Weisbach (1806 – 1871) e Henry Darcy (1803 – 1858), apoiando-se nos trabalhos de Chézy, desenvolveram a chamada fórmula de Darcy-Weisbach ou fórmula universal, a primeira que procurou relacionar a natureza do material à perda de carga e, por isso, é considerada por muitos como a fórmula mais correta para a previsão de perda de carga.

Após a formulação de Darcy-Weisbach, o problema da quantificação de perda de carga em tubulações parecia ter sido resolvido. Entretanto, um outro problema ainda persistia: resultados conflitantes entre os modelos teóricos e práticos. Este cenário torna-se claro a partir do momento em que dois pesquisadores passam a abordar o problema a partir da divisão do escoamento em regiões onde a diferença fundamental fosse a influência da superfície da tubulação e viscosidade sobre a velocidade. Os principais formuladores desta perspectiva, que se chamaria teoria da camada limite, foram Osborn Reynolds (1842-1912) e Ludwig Prandtl (1875-1953). Reynolds formulou uma lei para o escoamento de fluido que permitiu classificá-lo em: Laminar, Transição e Turbulento. Já Prandtl, junto com sua equipe de orientandos acadêmicos, forneceu uma forma de previsão para o fator de atrito baseado no conceito proposto por ele de camada limite.

Com isso, os pesquisadores citados acima promoveram uma profunda modificação na relação como o homem avaliava o escoamento até o final do século XIX, e, dessa forma, permitiram que posteriores alterações nas formulações pré-existentes de previsão de perda de carga, uma vez que surgiram cientistas que procuraram maneiras mais eficientes de determinar a resistência ao escoamento e que apresentassem em sua formulação o conceito de camada limite a partir da utilização do número de Reynolds em sua modelagem. Dentre os pesquisadores que propuseram alterações na maneira de determinar o fator de resistência estão: Hagen-Poiseuille, Nikuradse, Cyril Colebrook e Cedric White, Lewis Moody e Hunter Rouse.

Após o esclarecimento dos domínios em que o escoamento dos fluidos e a perda de carga respeitaria os modelos propostos, os cientistas sucessores da época passaram a procurar modelos que pudessem ser utilizados com mais simplicidades e, alguns, procuraram modelos para resolver problemas mais específicos da época. Da notável escola francesa, o próximo estudante que ganhou notoriedade foi Maurice Lévy (1838 – 1910). A importância da formulação de Lévy esteve em propor uma correlação entre a idade do material e a perda de carga através de diferentes valores que podem ser tabelados para

o coeficiente de perda de carga. Esta mesma forma de avaliação também foi proposta por Manning (1816 – 1897) e Flamant (1839 – 1915), em que procuraram avaliar a influência do estado do material sobre a perda de carga.

Em seguida, a fórmula de Hazen – Williams (Alan Hazen, 1869 – 1930, e G.S. Williams, 1866 – 1931) recebeu significativo crédito por propor uma maneira mais fácil de determinar o fator de perda de carga, através da determinação de coeficientes, obtidos de forma experimental. Dessa forma, este coeficiente de rugosidade de Hazen – Williams pode ser determinado por tabelas que variam em função do tipo de material.

Já o modelo empírico proposto por Fair-Whipple-Hsiao ganhou notoriedade não apenas pela simplicidade do método, mas também devido, principalmente, aos excelentes resultados que podem ser obtidos, desde que a aplicação ocorra dentro das limitações propostas pelo próprio método: equações específicas para o tipo de material, formulação específica para diâmetros menores que 100 mm e trechos curtos.

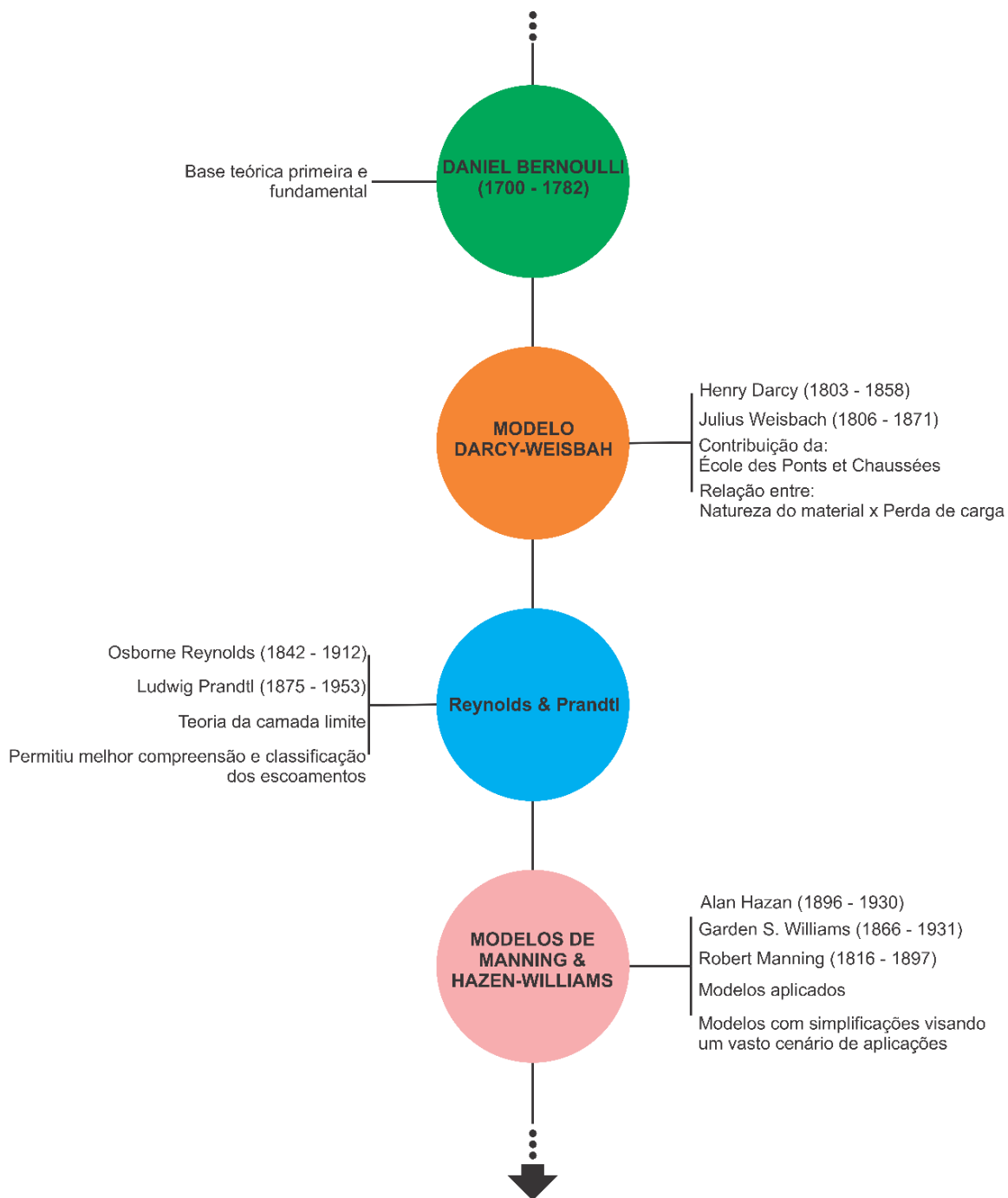
A importância do modelo desenvolvido por Fred Charles Scobey (1880 – 1962) está na restrição do uso em projetos de tubulações utilizados em sistemas de irrigação por aspersão e por gotejamento; entretanto, é válida a comparação de resultados obtidos por diferentes métodos para adoção do mais conveniente.

A partir da limitada análise histórica realizada neste trabalho, selecionamos quatro principais momentos marcantes para a evolução do tratamento humano em relação à perda de carga em tubulações sob pressão, estes marcos selecionados compõem a nossa perspectiva relativa, e não tem o intuito de limitar o número de possíveis marcos existentes na história da evolução das equações de perda de carga, podendo apresentar outros momentos marcantes. O primeiro momento com a fundamentação do escoamento de fluidos à luz de teorias matemáticas e físicas seria o primeiro grande marco promovido por Bernoulli, a partir dos estudos de matemáticos e físicos da época. O segundo grande momento está associado às primeiras tentativas de preenchimento da lacuna deixada pelo modelo teórico proposto por Bernoulli. Nesta etapa diferentes autores procuraram resolver este problema; entretanto, a escola francesa merece destaque devido ao número de contribuições fornecidas. Nesta etapa, o modelo de Darcy-Weisbach também deve ser citado. O terceiro grande marco para a evolução da teoria de perda de carga hidráulica foi a formulação da teoria da camada limite promovida por Reynolds e Prandtl, uma vez que a partir do momento em que o ser humano compreende que o escoamento não é válido para todos os níveis de velocidade. O tratamento da perda de carga passou a ficar mais claro e limitado em relação aos projetos e, dessa forma, o quarto grande marco para a evolução da teoria de perda de carga hidráulica inicia com projetos que procuraram não apenas simplificar as formulações anteriores, mas também especificar o campo de atuação para projetos e materiais específicos.

Considerando a disposição temporal dos eventos históricos citados, é possível elaborar um quadro com a cronologia dos principais feitos para a perda

de carga e, também, é possível categorizar estes feitos subdividindo-os em quatro principais contribuições, conforme Quadro 3 e Figura 11.

Figura 11: Distribuição temporal de significativas contribuições para a evolução dos modelos de previsão de perda de carga em condutos forçados.



Fonte: O próprio autor, 2022.

Esta figura representa uma perspectiva do autor e está fundamentada no paradigma da evolução científica permitida por problemas resolvidos de forma sucessiva e cronológica, onde um cientista apoia-se em teorias do passado para fundamentar novos modelos.

Quadro 4: Principais autores que formularam hipóteses especificamente para perda de carga, em ordem cronológica

Daniel Bernoulli (1700 – 1782)	Suíça.	Pioneiro da abordagem teórica da perda de carga. Lançou um importante referencial teórico para cientistas sucessores.
Antonine de Chézy (1718 – 1798)	França.	Pioneiro da abordagem experimental relativo à perda de carga.
Gaspard de Prony (1755 – 1839)	França.	Aluno de Chézy. Propôs uma relação mais aceita para a resistência ao fluxo hidráulico.
Julius Weisbach (1806 – 1871)	Alemanha.	Contribuiu com o modelo Darcy-Weisbach para perda de carga.
Henry Darcy (1803 – 1858)	França.	Junto com Julios Weisbach, desenvolveu o modelo Darcy-Weisbach para perda de carga.
Maurice Lévy (1838 – 1910)	França.	Desenvolvimento de expressão para perda de carga.
Robert Manning (1816 – 1897)	Irlanda.	Desenvolvimento de expressões de perda de carga em tubulações sob pressão e em canais abertos.
Alfred-Aimé Flamant (1839 – 1915)	França.	Contribuiu com o modelo de previsão de perda de carga baseando-se em modelos propostos por outros cientistas.
Alan Hazen (1869 – 1930)	E.U.A.	Contribuiu com o desenvolvimento do modelo Hazen-Williams de perda de carga.
Garder S. Williams (1866 – 1931)	E.U.A.	Junto com Alan Hazen, desenvolveu o modelo Hazen-Williams de perda de carga em tubulações sob pressão.

Continua

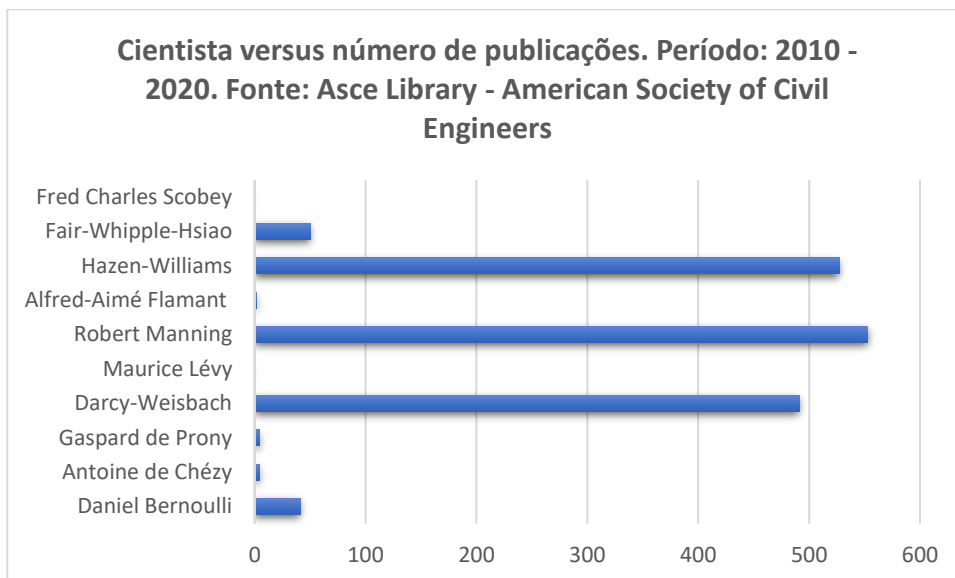
Quadro 5: Principais autores que formularam hipóteses especificamente para perda de carga, em ordem cronológica

Fair Whipple-Hsiao (1930)	<não encontrado>	Desenvolveu um modelo de previsão de perda de carga específico para tubulações com seção menor que 100mm de diâmetro.
Fred Charles Scobey (1880 – 1962)	E.U.A.	Desenvolveu um modelo de previsão de perda de carga voltado para projetos de irrigação.

Fonte: O próprio autor, 2021.

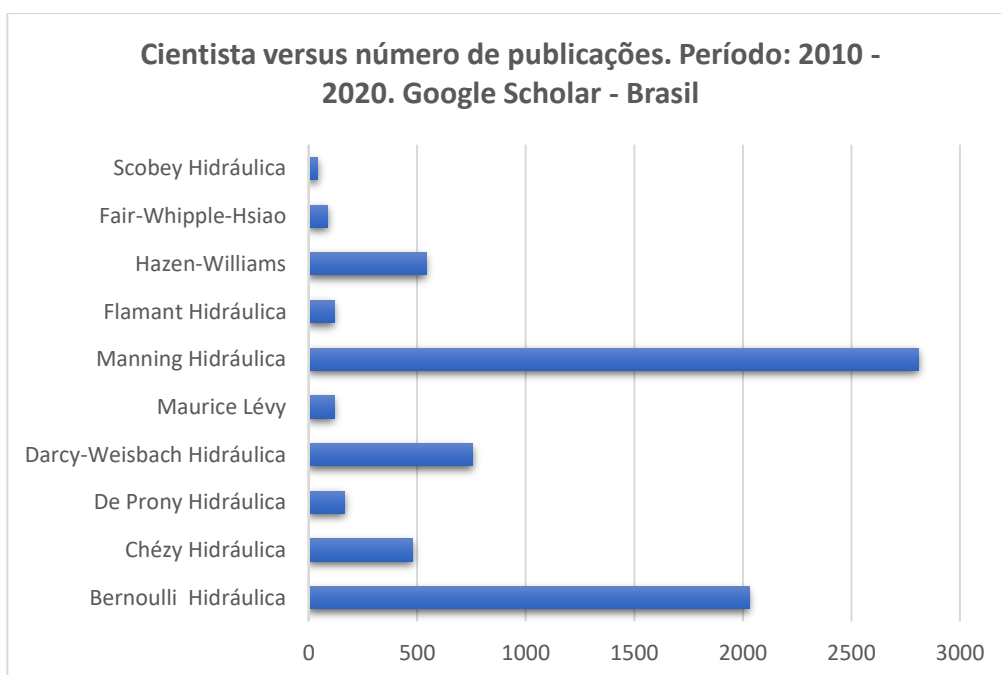
À luz dos dados graficados (Figuras 12 (a) e Figura 12(b)), percebe-se a importância dada aos trabalhos de alguns pesquisadores em função da quantidade de publicações (Figura 12(a)) e de pesquisas na Web (Figura 12(b)). É possível perceber que os pesquisadores Bernoulli, Robert Manning e os modelos de Darcy-Weisbach, Hazen-Williams e Fair-Whipple-Hsiao tiveram, no período de 2010 a 2020, maior notoriedade quando comparado com os demais pesquisadores presentes no gráfico e mencionados neste trabalho. Na primeira avaliação, que tomou dados das revistas listadas no site da Associação de Engenheiros civis da América (Figura 12(a)), Robert Manning obtém 553 pesquisas listadas, enquanto que Hazen-Williams aparece com 527 pesquisas listadas e Darcy-Weisbach com 491 pesquisas. Juntos, os três correspondem a 93,96% dos resultados. Na segunda avaliação (Figura 12(b)), que leva em consideração dados do Google Scholar, Robert Manning aparece com 2810 pesquisas, Darcy-Weisbach com 491 e Hazen-Williams com 527. Juntos, os três pesquisadores correspondem a 57,46% dos resultados.

Figura 12(a): Quantidade de pesquisas referenciada por cientista, com base em dados obtidos em revistas e artigos



Fonte: Elaborado pelo próprio autor, 2021.

Figura 12(b): Quantidade de pesquisas referenciada por cientista, com base em dados obtidos no Google Scholar - Brasil.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor, 2021.

A razão para esta distribuição pode estar relacionada não apenas devido ao pioneirismo assumido por alguns destes cientistas, a exemplo de Bernoulli e a sua proposição, uma das primeiras na história da evolução da teoria hidráulica, que serviu de base para os pesquisadores seguintes, mas também pode estar

relacionada à proposição de modelos que se aplicam em diversos projetos e são passíveis de sofrerem adaptações e ajustes para diferentes aplicações, conforme os modelos de Darcy-Weisbach, Hazen-Williams e Fair-Whipple-Hsiao. O modelo de Robert Manning, em ambas as pesquisas, apresentou o maior número de pesquisas relacionadas, tendo como possível razão a variedade de tubulações sob pressão que o modelo pode ser aplicado e também às outras diferentes aplicações e modelos propostos pelo cientista para escoamentos em canais abertos.

Quadro 6: Principais pesquisadores/modelos e as respectivas aplicações de seus métodos.

Daniel Bernoulli	Energia do fluxo em vasos sanguíneos, Confeção de bocais, diafragmas e medidores de Venturi.
Darcy-Weisbach	Dimensionamento de rede de abastecimento de água, projetos de condutos forçados, vertedores e canais, utilizado pelo software EPANET e aconselhado pela NBR 12218/94.
Hazen-Williams	Perda de carga em tubulações comerciais, dimensionamento de hidrantes. Utilizado pelo Software EPANET.
Fair-Whipple-Hsiao	Previsão de perda de carga em projetos de instalações prediais de água fria.
Robert Manning	Perda de carga em tubos e condutos livres.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor, 2021.

O desenvolvimento de modelos de previsão de perda de carga se deu, principalmente, entre os anos de 1700 a 1900, com diversos ensaios e trabalhos realizados por diferentes pesquisadores e em diferentes locais do mundo. É importante citar que o conjunto de modelos matemáticos tratados neste trabalho não contempla todos os modelos existentes que, segundo alguns autores, pode chegar a mais de cem formulações. Além disso, apesar de não ser o objetivo deste trabalho, é válido mencionar que se faz necessário entender as limitações de cada método para que se possa fazer uma escolha adequada e, a depender do projeto, que se faça ajustes nos parâmetros do modelo, a fim de evitar a escolha de métodos que podem apresentar grandes desvios em relação à perda de carga real.

Dessa forma, o principal aspecto, não apenas para justificar o maior número de pesquisas publicadas entre os modelos, mas também para justificar a maturidade que a teoria hidráulica alcançou pode ser resumido na seguinte frase proferida por Isaac Newton: “Se eu vi mais longe, foi por estar sobre ombros de gigantes”.

6.0 CONCLUSÃO

Nesse trabalho, buscou-se realizar uma pesquisa exploratória a respeito das formulações para a perda de carga em condutos forçados, cujo principal objetivo foi de apresentar uma perspectiva cronológica das principais contribuições para estas formulações.

É c3ognito de cientistas e pesquisadores a condi33o da permissividade dada 33 evolu33o de algo atrav33s do desenvolvimento de ci33ncias, e, na evolu33o das equa33o33es de perda de carga, percebemos que o paradigma n33o foi diferente. Ao estudarmos acerca das equa33o33es de perda de carga, notamos que, assim como Daniel Bernoulli tinha a f33sica e a matem33tica como refer33ncias que nortearam o desenvolvimento de sua proposta, Antonie Ch33zy tinha como refer33ncia o modelo de Daniel Bernoulli e, conseq33entemente, se apoiava em um acervo te33rico de algu33m para desenvolver sua proposta. Naturalmente, isso gerou, na evolu33o da teoria da hidr33ulica tratada neste trabalho, in33meras possibilidades que, aos poucos, estreitaram o caminho para o desenvolvimento de formula33o33es cada vez mais eficientes.

Dentro desta perspectiva 33 de f33cil conclus33o que o desenvolvimento da teoria hidr33ulica de perda de carga em condutos forçados foi uma contribui33o conjunta em intervalos de tempo diferentes, tendo como principais destaques: Daniel Bernoulli lan33ando a base da teoria fundamental de fluxo, Modelo conjunto de Darcy-Weisbach, Teoria da camada limite proposta pelos cientistas Reynolds & Prandtl e modelos aplicados de Manning e Hazen-Williams.

Espera-se que os achados levantados neste trabalho sobre as contribui33o33es ao estudo da perda de carga em condutos forçados, expostos em uma sequ33ncia hist33rica e identificadas suas caracter33sticas principais, origens e influ33ncias, bem como, uma estimativa de notoriedade, contribuam para o estudo deste tema, de forma pontual ou geral, conforme o intuito do leitor e, independentemente deste objetivo, promova uma compreens33o ampla da evolu33o da teoria da perda de carga a partir da vis33o de ci33ncia como c33clica e de natureza interdependente, sequencial e contributiva.

Por fim, conclui-se que, diante de um tema t33o vasto, este trabalho jamais atingiria uma vis33o hol33stica plena das equa33o33es da perda de carga em tubula33o33es forçadas em poucas p33ginas, nem em conte33do nem em cronologia. Entretanto, achados mais amplos e de conte33dos mais espec33ficos poder33o ser obtidos com a pesquisa de textos originais e bibliografia mais especializada que a utilizada neste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BAPTISTA, M. B.; PINTO, M. M. L. **Fundamentos de engenharia hidráulica**. Belo Horizonte. UFMG, 2010. 3 ed. 443p.

BAPTISTA, M. B.; PINTO, M. M. L. **Fundamentos de engenharia hidráulica**. Belo Horizonte. UFMG, 2016. 4 ed. 447p.

BAILEY, S. **A cross section of a typical qanat**. Wikimedia.org, 2009. Wikimedia.org. Disponível em: < https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Qanat_cross_section.svg > Acesso em: 01/03/2022.

BOMBARDELLI, F. A., García, M. H. (2003). **“Hydraulic Design of Large-Diameter Pipes.”** *J. Hydraul. Eng.*, 129(11), 839-846.

BROWN, G. O. **Henry Darcy and the making of a law**. Water Resources Research, Vol. 38, N° 7, 2002.

CARVALHO, J. de A., AQUINO, R. F., PEREIRA, G. M., RODRIGUES, R. C., CAMPOS, T. B. **Perda de carga em tubos de PVC conduzindo água residuária do processamento de café**. Rev. Bras. de Eng. Agríc. Ambiental. 13. 2009.

CENCI, C. S., SILVA, A. F., KIYOTANI, M. S. M., TAMIOSSO, M. F. **Análise do desempenho das equações usuais de perda de carga distribuída em tubulações pvc**. Anais do 8º Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão da UNIPAMPA. v.8, n. 2. 2016.

DA SILVA, I. H. V. B. **Diagnóstico do consumo de água em redes de distribuição através de modelagem computacional**. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal do Cariri. Juazeiro do Norte – CE, 2017.

DA SILVA, F. J. A. **Perda de água em sistemas públicos de abastecimento no Ceará**. Artigo. Revista Tecnologia v.26 n.1. Universidade de Fortaleza – 2005.

DE ARAÚJO, J. A. F., OLIVEIRA, A. A. e S., CASTRO, M. P. S., DOS SANTOS, S. H. L., PEREIRA, R. F., DE ANDRADE, P. N., FERNANDES, W. de S., ARAÚJO, F. T. de V., DE OLIVEIRA, C. B. Z., DA SILVA, F. J. A. **Aplicação do aço patinável em uma adutora: um estudo comparativo com o policloreto de vinila**. Interfaces entre Desenvolvimento, Meio ambiente e Sustentabilidade. Vol 2. 2020.

ETTEMA, R. *Hunter Rouse – His Work in Retrospect*. Colorado State University. Article in **Journal of Hydraulic Engineering**. No. 12. Vol. 132.

ENCICLOPÉDIA LIVRE, Wikipédia. **Robert Manning (engenheiro)**. Disponível em: < [en.wikipedia.org/wiki/Robert_Manning_\(engineer\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Robert_Manning_(engineer)) >. Acesso em: 10 de Outubro de 2021.

ENCYCLOPEDIA.COM. **Weisbach, Julius Ludwig**. Disponível em: < <https://www.encyclopedia.com/science/dictionaries-thesauruses-pictures-and-press-releases/weisbach-julius-ludwig> >. Acesso em: 10 de Outubro de 2021.

ENCYCLOPEDIA.COM. **Lévy, Maurice**. Disponível em: < <https://www.encyclopedia.com/science/dictionaries-thesauruses-pictures-and-press-releases/levy-maurice> >. Acesso em: 10 de Dezembro de 2021.

ENCYCLOPEDIA BRITANNICA VIRTUAL, Britannica.com. **Henri-Philibert-Gaspard Darcy. French Engineer**. Disponível em: < <https://www.britannica.com/science/Darcys-Law> >. Acesso em: 10 de Novembro de 2021.

FRANQUET BERNIS, J. M. ***New proposed formulations for the calculation of hydraulic conductions***. Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED). Spain, 2020.

FRANCO IBARS, R. A. **Desenvolvimento e avaliação de tubos Venturi para medição de vazão**. Dissertação de mestrado. Piracicaba, 2004. 61 p.

FREIRE, L. S. **Teorias de camada limite atmosférica: modelo de crescimento, fluxo de entranhamento e análise espectral**. Programa de Pós Graduação. Universidade Federal do Paraná – Curitiba. 2012.

FURUSAWA, R. T. **Contribuição ao dimensionamento de rede de distribuição de água por critério de custo global**. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2011.

FREEJOURNAL.ORG: **Alfred-Aimé Flamant**. 05-09-2021. Disponível em: <pt.freejournal.org/2109923/1/alfred-aime-flamant.html>.

GALDINO, W. R. de C., EDMUNDO, D. A., FERREIRA, H. L. E. **Estudo das equações de Hazen-Williams e Darcy-Weisbach aplicadas ao dimensionamento hidráulico de hidrantes**. INIC – Encontro Latino Americano de Iniciação científica e Pós Graduação. Faculdade Ananhanguera de São José dos Campos SP. 2019.

GOMES, I. V. C. A. **Analogias da experiência na física: limites e alternativas**. Programa de Pós-Graduação. Repositório da universidade federal da Paraíba – Recife. 2010.

GRISON, F., MOTA, A. de A., KOBAYAMA, M., CARDOSO, A. T., MONTEIRO, L. R. **Avaliação dos métodos de estimativa do coeficiente de Manning em um canal fluvial**. Simpósio brasileiro de recursos hídricos. Bento Gonçalves – RS. 2013.

HAGER, W.H., "**Blasius: A life in research and education**". Experiments in Fluids. 2003.

HENEINE, Ibrahim Felipe. **Biofísica Básica**. 3ª Edição. São Paulo: Editora Atheneu, 2000.

HARAPA.COM. **Rain Outlets, DK-I Area**. Disponível em: <harappa.com/indus6/ancientindusdrains84.html>. Acesso em: 27 de Novembro de 2021.

HARAPA.COM. **Bathing Platform, DK-I Area**. Disponível em: <harappa.com/indus6/bathingfloor82.html>. Acesso em: 27 de Novembro de 2021.

KAPP, M. S. **Perda de carga em aquecedores de passagem do tipo serpentina**. Trabalho de conclusão de curso. UFPR, 2018.

KOPPELMAN, E. ENCYCLOPEDIA.COM. **Dictionaries thesauruses pictures and press releases**: Maurice, Levy.

LACERDA, K. B., AMORIM, A. E. A. **Perfil de Velocidade para o Escoamento de Fluido em uma Placa Plana**. Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 23, no. 2, Junho, 2001.

LISIUK, F. G., ZABALO, P. A., ELASKAR, S. A. **Análisis Teórico y por elementos finitos de las pérdidas de carga en un sistema de riego de pivote central**. Mecânica Computacional Vol XXVI, pp.1977-1996. Departamento de Aeronáutica. Universidade de Córdoba. Córdoba, Argentina. 2007.

LOPES, L. G. C. O. **Controle a estrutura variável aplicado a um atuador hidráulico**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina – Florianópolis. 1997.

MADEIRA, J. F. L. **Simulador computacional para fluidos incompressíveis**. Monografia. Centro Universitário de Brasília – UniCEUB. Brasília – DF: 2006.

MEZZOMO, W., PEITER, M. X., ROBAINA, A. D., PEREIRA, A. C., PIMENTA, B. D., MEDEIROS, E. P., PIROLI, J. D., DA SILVA, J. G., BRUNNING, J., FERREIRA, L. D., PINTO, L. de M., NETO, M. C, BOSCAINI, R., FLORES, Y. R. **Comparação de diferentes equações de perda de carga aplicadas na determinação da vazão e da velocidade da água em sistemas hidráulicos**. XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Foz do Iguaçu – PR. 2019.

MENEZES, A. H. N., DUARTE, F. R., CARVALHO, L. O. R., SOUZA, T. E. S. **Metodologia científica teoria e aplicação na educação a distância**. Petrolina - PE, 2019.

MILNE, S. **Onde a escassez de água já provoca guerras no mundo (e quais as áreas sob risco iminente)**. BBC Future. Agosto de 2021.

MOHSEN, T. ***Ghasabe Qanats of Gonabad.jpg***. Wikimedia.org, 2015. Disponível em: < https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ghasabe_Qanats_of_Gonabad.jpg >. Acesso em: 01/03/2022.

NETO, O. R., TAVARES, V. E. Q., FARIA, L. C., KOPP, L. M., TIMM, L. C. **Comportamento das equações de scobey, manning e fair-whipple-hsiao quando utilizadas para estimativa da perda de carga em tubos com comportamento elástico**. Revista Brasileira de Agricultura Irrigada. v.10. nº.1, p.420. 2016.

NETO, J. M. de A. **Manual de hidráulica**. 9. ed. São Paulo: Blucher, 2018.

NETSABER: BIOGRAFIAS. **Fred Charles Scobey**. Disponível em: < biografias.netsaber.com.br/biografia-2053/biografia-de-fred-charles-scobey >

NBR 5626. Instalação predial de água fria. ABNT - 1998.

PASSOS, J. C. **O conceito de camada limite: Uma revisão crítica de livros-texto de transferência de calor**. VI Congresso nacional de engenharia mecânica. Campina Grande – PB, 2010.

PORTAL HIDRAULICA.TOLENTINO. 6.3 **Perda de carga contínua**. Disponível em: < <https://hidraulica.tolentino.pro.br/perda-de-carga-cont%C3%ADnua.html#f%C3%B3rmula-de-flamant> >

PORTO, R. M. **Hidráulica básica**. São Carlos. EESCO – USP, 2006. 540p.

RITZI Jr., R. W., BOBECK, P. **Comprehensive principles of quantitative hydrogeology established by Darcy (1856) and Dupuit (1857)**. Water Resources Research, vol. 44, W10402, 2008.

ROSENHAGEN, A. G. J. **Aplicação de uma fórmula de transporte de sedimentos considerando ondas e correntes em um modelo hidrosedimentológico**. Rio de Janeiro: UFRJ/COPE, 2013.

SAMPAIO, S. C., CILENE, K., BOAS, M. A. V., DE QUEIROZ, M. M. F., GOMES, B. M., FAZOLO, A. **Equação de Hazen-Williams corrigida para água residuária proveniente da suinocultura**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. v.11, n.1, p.5-10, 2007.

SAMPAIO, S. C., PESSI, E., SUSZEK, M. **Análise comparativa de perda de carga contínua observada em laboratório e estimada por meio de equações**. Revista Varia Scientia Agrárias. v.01, n. 01, p.75-79. 2010.

SIMÕES, A. L. A., SCHULZ, H. E., PORTO, R. M. **Efeito da turbulência na determinação da superfície livre para o cálculo da resistência aos escoamentos em canais com fundo em degraus**. RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos. Volume 19. N.4. 2014.

SIMMONS, C. T. ***Happy 200th birthday Mr Darcy and our thanks for your law! A tribute editorial celebrating the life and times of the father of our science, Henry Darcy (1803-1858)***. Hydrogeology Journal. 11, 611-614. 2003.

TAVARES, V. E. Q., FARIA, L. C., KOPP, L. M., TIMM, L. C. **Comportamento das equações de scobey, manning e fairwhipple-hsiao quando utilizadas para estimativa da perda de carga em tubos com comportamento elástico**. Revista Brasileira de Abicultura Irrigada. 2016.