

ARMANDO TRAINI FERREIRA

ESTUDOS HIDRÁULICOS EM SISTEMAS DE BACIAS SANITÁRIAS

**Dissertação apresentada à
Escola Politécnica da
Universidade de São
Paulo para a obtenção do
título de Mestre em Engenharia**

Área de concentração:
Engenharia Civil

Sub-área:
Engenharia Hidráulica

Orientador:
Prof. Dr. Podalyro Amaral de Souza

São Paulo
2009

SUMÁRIO

Dedicatória.....	iii
Agradecimentos	iv
Lista das figuras.....	v
Lista das tabelas	viii
Lista de Símbolos.....	ix
Resumo	xii
Abstract.....	xiii
Definições adotadas	xiv
Introdução.....	1
1. Revisão bibliográfica	3
1.1 Pesquisas realizadas	3
2. Estudos Hidráulicos do sistema bacia sanitária	13
2.1 Cálculo simplificado da distância borda-poço	23
2.1.1 O efeito Splash	23
2.2 Bacias sanitárias de ação sifônica.....	43
2.2.1 Uso das equações de Abramovich	44
2.2.2 Volume do tronco-cônico.....	59
2.2.3 Cálculo da perda de carga no sifão-trompa	60
2.2.4 Cálculo do volume da sifonagem da trompa	64
2.2.5 Forças hidráulicas atuantes	65
2.2.6 Verificações do desconector (anexo C da NBR 8160:1999).....	68
3 Estudos Experimentais.....	81
3.1 Equacionamento	81
3.2 Determinação do hidrograma a montante da tubulação de saída da bacia sanitária.....	91
3.3 Determinação da curva chave a jusante da tubulação de saída da bacia sanitária.....	93
3.4 Determinação da tensão de cisalhamento mínima.....	96
3.5 Determinação da tensão de cisalhamento máxima.....	99
3.6 Estimativa do consumo de água	99
4.1 Conclusões	108
4.2 Recomendações	109
5 Bibliografia.....	110

Dedicatória

Na luz do trabalho

“Beneficência é também agradecer o trabalho alheio e caminhar construindo.

Quando transites na estrada, lança um pensamento de gratidão aos que se feriram nas lajes para que as tivesses; fartando-se à mesa, lembra as dilacerações do lavrador que tratou a semente para que o pão te regalasse; no lar, recorda os que te levantaram o agasalho doméstico, muitas vezes, à custa da própria vida; no simples copo de água que te aplaque a sede, podes meditar nos braços que se conjugaram, em múltiplas tarefas, a fim de que a recolhesses, pura, do filtro...

Em toda a parte, inclina-se a vida, à frente de nós, amparando-nos, atenta, de modo a que aprendamos dela o dom de servir.

Não há fruto que apareça maduro.

Humilde molho de maravilhas que te garanta o lume exigiu laboriosa atividade da Criação.

Tudo o que existe de útil reclamou humildade, disciplina, constância, paciência.

A Sabedoria Divina tudo dispôs para que os grandes e os pequenos se entrelacem, na sustentação do bem eterno, conservando cada qual em seu nível de distinção.

O sol alimenta o verme. O verme aduba a terra.

A planta nutre o sábio. O sábio ergue a escola.

Por mais que brilhe no firmamento, a estrela não faz o papel da flor que perfuma e o oceano imponente não substitui o regato, que canta ignorado nas entranhas da gleba, para que o vale se coroe de verdura.

Tudo se esforça, junto de nós, para que a alegria nos sobeje, além do necessário. Se já atingiste o discernimento iluminado pela convicção da imortalidade, possuis bastante acústica no raciocínio para assinalar o apelo constante da vida: trabalha, trabalha!...

Se já sabes que outros mundos se seguem a este mundo por degraus da evolução, não desconheces que o teu merecimento, aqui ou além, será medido por tuas obras. Não te dês, assim, ao logro do desânimo e nem te confies ao perigoso luxo do tédio.

Refletamos nas forças do Universo, que nos servem infatigavelmente sem perguntar, e para que a beneficência se nos alteie, genuína, do coração, trabalhemos e trabalhemos.”

Emmanuel

Agradecimentos

A todos os seres que me ajudaram a compreender os meus potenciais de ser:

À Deus, origem da vida, fonte de orientações.

Aos meus pais, origem e orientações desta minha vida.

À Anna Maria de Oliveira, namorada e amiga em minha jornada de conhecimento.

Ao meu orientador e amigo “Paidalyro” por suas orientações seguras neste trabalho.

Aos funcionários do CTH – Centro Tecnológico de Hidráulica da Área de Acrílicos - José Amaro e Plínio e da Área de Instrumentação Eletrônica – Flávio e David no auxílio da montagem dos ensaios.

Aos Engenheiros Ms. Gisele Sanches Silva e Ms. Humberto Oyamada Tamaki, do programa PURA (Programa do Uso Racional da Água) da Universidade de São Paulo, por informações relativas aos artigos do CIB.

Ao Professor Dr. Rodrigo de Melo Porto e André Luiz Andrade Simões, da EESC-USP (Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo), pela simulação da onda de cheia.

E a todos que me auxiliaram no crescimento.

Lista das figuras

Figura 1: Torre hidráulica construída pelo Eng° Herr Uma, da cidade de Colônia, em 1890 (Alemanha) – fonte: [47]	4
Figura 2: Evolução das Pesquisas de Sistemas Prediais no Brasil – fonte [42]	5
Figura 3: Forças atuantes na tubulação de saída da bacia sanitária (Ujamhan – Brunel University [72])	10
Figura 4: Detalhe das forças atuantes no sólido, na tubulação de saída da bacia sanitária (citado em Ongoren et al. [58])	11
Figura 5: Atuações do Proacqua (apud Gonçalves in Seminário: “Conservação, Uso Múltiplo e Reuso de Água em Saneamento Básico”)	14
Figura 6: Dimensões padronizadas constantes na NBR 15099:2004 [24]	16
Figura 7: Correspondência entre os valores A2 citados na NBR 15099 e os valores de modelos de bacias sanitárias internacionais (fontes: [23], [13], [12], [15],[10],[50])	18
Figura 8: Correspondência entre os valores A3 citados na NBR 15099 e os valores de modelos de bacias sanitárias internacionais (fontes: [23], [13], [12], [15],[10],[50])	19
Figura 9: Correspondência entre os valores A6 citados na NBR 15099 e os valores de modelos de bacias sanitárias internacionais (fontes: [23], [13], [12], [15],[10],[50])	20
Figura 10: Correspondência entre os valores A8 citados na NBR 15099 e os valores de modelos de bacias sanitárias internacionais (fontes: [23], [13], [12], [15],[10],[50])	21
Figura 11: Correspondência entre os valores A16 citados na NBR 15099 e os valores de modelos de bacias sanitárias internacionais (fontes: [23], [13], [12], [15],[10],[50])	22
Figura 12: Queda de objeto em uma superfície líquida: no caso (a) forma-se vórtices e no caso (b) existe a formação de jatos (citado em Bizotto[29])	23
Figura 13: Gráfico Viscosidade Absoluta (Pa . s) x Temperatura (°C) (fonte: Fox [35])	25
Figura 14: Queda de objeto em um líquido (leite) – efeito Splash (fonte: [44])	26
Figura 15: Variação da superfície de líquido devido à queda de uma esfera de tungstênio (fonte: Nigen [55])	27
Figura 16: Variação da superfície de líquido devido à queda de uma pequena barra de alumínio (fonte: Nigen [55])	27
Figura 17: Variação da superfície de líquido devido à queda de anel de alumínio em superfície de viscosidade = 0,75 Pa.s (fonte: Nigen [55])	27
Figura 18: Variação da superfície de líquido devido à queda de uma pequena barra de madeira (fonte: Nigen [55])	28
Figura 19: Variação da superfície por uma queda de uma gota de água na água (fonte: Cheny [31])	29
Figura 20: Relação entre o número de Weber crítico e a temperatura do líquido alvo (fonte: Manzello [48]).	30

Figura 21: Modelo de Mendes [50] para o estudo em questão (valores em caneta foram colocados por esta Dissertação para auxílio nos cálculos).....	31
Figura 22: Forças atuantes em um corpo em queda	32
Figura 23: Estimativa entre as dimensões do objeto de queda	33
Figura 24: Croqui para auxílio da estimativa do jato de Worthington	38
Figura 25: Raio “r” da esfera correspondente	39
Figura 26: Formação e queda de uma gota d’água (Azevedo Neto [54]).....	40
Figura 27: Bacia sanitária de ação sifônica (fonte: [61])	43
Figura 28: Sistema de jato periférico da empresa TotoUSA [12] (modelo Neorest 600)	44
Figura 29: Descarga com jato periférico (apud Landi [47]).....	45
Figura 30: Descarga com vórtice (apud Landi [47])	45
Figura 31: Formação de redemoinho (foto tirada na Estação Ciência – São Paulo [1] na seção Furacões, em 11/01/08)	46
Figura 32: Definição dos valores em planta do vaso sanitário.....	47
Figura 33: Definição, em perfil da bacia sanitária, para as equações de Abramovich.....	47
Figura 34: Triângulo de velocidades na saída da bacia sanitária.....	56
Figura 35: Gráfico ϵ, μ versus A (Equações de Abramovich [53])	58
Figura 36: Croqui para cálculo do volume de água do fecho hídrico.....	59
Figura 37: Definição esquemática da perda de carga distribuída em uma tubulação, antes da formação do escoamento desenvolvido.	62
Figura 38: Croquis para auxílio do volume de água no fecho hídrico do sifão-trompa	64
Figura 39: Croquis para auxílio do cálculo da pressão sobre a superfície do poço ...	66
Figura 40: Fluxograma representativo do Modelo Aberto de Dimensionamento Otimizado dos SPES. [63]......	69
Figura 41: Topologia estudada para verificação do desconector	70
Figura 42: Mecanismo hidráulico no tubo de queda (Cheng [30]).....	79
Figura 43: Definição do volume de controle do reservatório de descarga (RD)	81
Figura 44 : Aferição da célula de carga	84
Figura 45: Célula de carga S-20 utilizada na aferição do nível do RD	85
Figura 46: Obtenção do peso do RD	86
Figura 47: Colocação do nível inferior de água	87
Figura 48: Colocação do nível superior de água até obter 10,000 kgf	88
Figura 49: Vista frontal da montagem do experimento.....	90
Figura 50: Vista lateral da montagem do experimento	91
Figura 51: Curva chave do reservatório de descarga.....	92
Figura 52: Hidrograma a montante da tubulação de saída da bacia sanitária	93
Figura 53: Determinação dos parâmetros da curva chave a jusante do sifão trompa.....	94
Figura 54: Topologia das simulações nos ramais de descarga	96
Figura 55: Hidrogramas em diferentes posições ao longo da tubulação fornecidos por Porto & Simões, através das informações do autor deste trabalho	97
Figura 56: Curvas chaves ao longo da tubulação fornecidas por Porto & Simões, através das informações do autor deste trabalho	97
Figura 57: Vista lateral da Topologia 2.....	102
Figura 58: Vista Frontal da Topologia 2	103

Figura 59: Variação do reservatório de descarga (Topologia 2).....	104
Figura 60: Hidrograma da Topologia 2.....	106
Figura 61: Curvas chaves da Topologia 2.....	106
Figura 62: Hidrograma da Topologia 2.....	107

Lista das tabelas

Tabela 1: Grupos de Usuários e os Desempenhos / Requisitos do Sistema, com indicação de grau de relevância (obs.: PNE = pessoas com necessidades especiais) – fonte [49].....	8
Tabela 2: Palavras-chaves mais citadas nos últimos dez anos no CIB W062 (fonte: PURA – USP).....	12
Tabela 3: Tabela comparativa dos ensaios previstos nas Normas Brasileira, Canadense e Americana, citado em Iha [42].	15
Tabela 4: Comparação entre valores dimensionais (mm) de bacias sanitárias (fontes: [23], [13], [12], [15],[10],[50]).....	17
Tabela 5: Resumo das características dos objetos ensaiados por Nigen [55].....	28
Tabela 6: Valores de ζ_w (fonte: Cheng [30]).....	78
Tabela 7 : Tabela resumo da aferição da célula de carga.....	83
Tabela 8 - continuação: Tabela resumo da aferição da célula de carga.....	84
Tabela 9: Valores do nível do reservatório de descarga em função do tempo	91
Tabela 10: Variação do reservatório em função do tempo (Topologia 2)	103
Tabela 11: Hidrograma da Topologia 2.....	105

Lista de Símbolos

A_2	:=	distância do eixo de entrada da bacia sanitária à face da parede mais próxima.	[mm]
A_3	:=	distância entre os furos para fixação do assento sanitário na bacia sanitária.	[mm]
A_6	:=	distância do piso acabado até a borda superior da bacia sanitária	[mm]
A_8	:=	distância do eixo de saída da bacia sanitária à face da parede mais próxima.	[mm]
A_{16}	:=	distância da face posterior da bacia sanitária à face da parede mais próxima.	[mm]
$A_{\text{projetada}}$:=	área frontal do objeto projetada sobre um plano perpendicular ao movimento do fluido	[m ²]
$C_{0,1}$:=	coeficiente de evaporação do desconector	[-]
C_d	:=	coeficiente de forma	[-]
D	:=	dimensão característica do objeto de queda	[m]
$D_{r,tv}$:=	depressão devida à tiragem térmica e ação do vento	[Pa]
e_i	:=	espessura da coroa circular no trecho do tubo de queda	[mm]
f	:=	fator de atrito na tubulação	[-]
F_{co}	:=	Força de Coriolis	[N]
F_d	:=	força de arraste do fluido no objeto	[N]
g	:=	aceleração da gravidade	[m / s ²]
h	:=	altura de queda do objeto	[m]
h'	:=	altura do jato de Worthington	[m]
$H_{0,1}$:=	altura do fecho hídrico inicial do desconector	[mm]
$h_{e,i}$:=	altura do fecho hídrico perdida por evaporação no desconector	[mm]
$H_{s,j}$:=	perda máxima da altura do fecho hídrico devido à depressão no desconector	[mm]
h_{TQ}	:=	altura do tubo de queda	[m]
l_s	:=	comprimento da parte seca do tubo de queda	[m]
k_i	:=	coeficiente de perda de pressão do ramal considerado	[-]
K_{TQ}	:=	coeficiente de máxima perda de pressão do ar no tubo de queda	[-]
L_t	:=	comprimento terminal	[m]

m	:=	massa do objeto	[kg]
n_c	:=	número de curvas na parte seca do tubo de queda	[-]
Q	:=	vazão de saída da bacia sanitária	[l/s]
Q_{ar}	:=	vazão de ar que escoar pelo núcleo do tubo de queda	[l/s]
R	:=	distância entre a entrada e a saída do poço da bacia sanitária, em um plano paralelo à borda do equipamento	[m]
Re	:=	Número de Reynolds	[-]
R_{vi}	:=	relação entre os volumes das câmaras de entrada e saída do desconector	[-]
S_0	:=	área da seção transversal da tubulação de saída do poço na bacia sanitária	[m ²]
S_1	:=	área da seção transversal da tubulação de entrada na bacia sanitária	[m ²]
$S_{a,s}$:=	sobrepessão máxima no sistema	[Pa]
t	:=	temperatura do fluido	[°C]
U	:=	velocidade de queda do objeto	[m/s]
u	:=	velocidade de saída no poço da bacia sanitária, perpendicular ao eixo de saída	[m/s]
V_0	:=	velocidade na seção transversal da tubulação de saída do poço na bacia sanitária	[m/s]
V_1	:=	velocidade do fluido na seção transversal da tubulação de entrada na bacia sanitária	[m/s]
V_e	:=	velocidade do vento	[m/s]
v_r	:=	velocidade de saída no poço da bacia sanitária, paralelo ao eixo de saída	[m/s]
V_t	:=	velocidade terminal	[m/s]
We_c	:=	Número de Weber crítico para formação de jatos	[-]
y	:=	umidade relativa do ambiente	[%]
α	:=	ângulo formado pelas velocidades “u” e “v _r ”	[°]
α_1	:=	fator de correção do perfil de velocidade a montante da tubulação do sifão-trompa	[-]

α_2	:=	fator de correção do perfil de velocidade a jusante da tubulação do sifão-trompa	[-]
γ	:=	peso específico da água	[N / m ³]
ΔH_t	:=	perda de carga total no sifão-trompa	[m]
Δt	:=	duração máxima da exposição à evaporação do fecho hídrico do desconector	[s]
ε	:=	coeficiente de contração do injetor	[-]
μ	:=	coeficiente de vazão	[-]
μ	:=	viscosidade do fluido	[Pa . s]
ρ	:=	massa específica da superfície alvo	[kg / m ³]
θ	:=	latitude do local	[°]
Θ_e	:=	temperatura do ar exterior	[K]
Θ_i	:=	temperatura do ar no interior do tubo de queda	[K]
σ	:=	tensão superficial da água	[N / m]
Π	:=	pressão de vapor d'água do ar saturado na temperatura ambiente	[Pa]

Resumo

Atualmente a visão sistêmica na compreensão dos problemas tem sido uma poderosa ferramenta e esta Dissertação aplicou estes conhecimentos aliados à economia de água, fonte de várias pesquisas atuais devido à preocupação deste bem cada vez mais escasso.

O objetivo deste trabalho foi a compreensão dos fenômenos hidráulicos em bacias sanitárias, utilizando-se o modelo proposto por Mendes, envolvendo várias áreas da engenharia: perdas de cargas em tubulações, verificações de Normas Brasileiras de produtos e sistemas prediais, aplicações de Quantidade de Movimento, estudos de jatos utilizando-se a teoria de Abramovich e o efeito “Splash” e as respectivas utilizações destas ferramentas nas análises do desempenho do sistema hidrossanitário.

A sugestão da obtenção de informações através do hidrograma de saída da bacia sanitária estudada permitiu, utilizando-se um reservatório de descarga graduado, a variação do nível e, conseqüentemente, informações hidráulicas relevantes: duração da descarga, volume consumido, a força de arraste induzida pelo escoamento (ação motriz da remoção dos sólidos) e as máxima e mínima tensões de cisalhamento.

A performance do equipamento estudado foi obtida devido a vários fatores, entre eles: o formato tronco-cônico com escoamento helicoidal interno às paredes do equipamento e o sifão trompa que difere dos sistemas atuais por permitir uma menor perda de energia quando do transporte de sólidos.

O modelo estudado apresentou resultados que, apesar de permitir melhoramentos, são otimistas quanto ao volume consumido (4 litros), além do fato de evitar o desconforto (dentro dos parâmetros estabelecidos) do efeito Splash aos usuários quando do ato de defecar e a remoção (simulada em softwares) dos resíduos no ramal de saída.

A principal conclusão deste trabalho é que as melhorias de desempenho em bacias sanitárias necessariamente passam pelo bom uso da Mecânica dos Fluidos e da Hidráulica.

Palavras-chave: economia de água, bacia sanitária, Instalações Hidráulicas e Sanitárias, Equações Abramovich, efeito Splash, Quantidade de Movimento.

Abstract

Currently, the systematic approach of problems comprehension has been a powerful tool. This knowledge was used on the present work, as well as information about water saving, subject of a lot of nowadays researches, considering the concern about this natural resource (water), scarcer with each passing day.

The purpose of this work was to understand the hydraulic phenomena at sanitary basins, using the model considered by Mendes, relating several engineering areas: load loss on tubings, verifications of Brazilian Norms about building products and systems, applications of motion quantity measuring, jets studies under the Abramovich theory, the "Splash" effect and the respective uses of these tools on the performance analysis of the hydro-sanitary system.

The suggestion of the information attainment through the exit hydrogram of the studied sanitary basin allowed, by using a graduated water flush reservoir, the level variation and, consequently, relevant hydraulic information: flush duration, volume of water consumed, drag force induced by drainage and the maximum and minimum shear tensions.

The performance of the studied equipment was obtained because of several factors, such as: truncated cone format with helical drainage internal to the equipment walls and the siphon tube that differs from the current ones, because it allows a smaller energy loss when transporting the solids.

The studied model has presented results that, despiste possible improvements, are optimistic about the volume of water consumed (4 liters), beyond the fact that prevents the discomfort of the "Splash" effect on the users (according to the established parameters) and facilitates the residues removal (simulated by softwares) from the exit branch.

The main conclusion of this work is that the performance improvements on sanitary basins are essentially related to good use of Fluid Mechanics and Hydraulics.

Keywords: water saving, sanitary basin, hydraulic installations, Abramovich equations, Splash effect, motion quantity.

Definições adotadas

Para este trabalho, foram adotadas as seguintes definições, obtidas de Normas Técnicas Brasileiras [23] , [24] e [27], sendo agrupadas de forma a facilitar a compreensão dos conceitos:

***Ação de arraste:** processo de funcionamento da bacia sanitária que faz uso da velocidade da água fornecida pelo aparelho de descarga, removendo os dejetos nela depositados (item 3.6 - NBR 15097:2004).*

***Ação sifônica:** processo de funcionamento da bacia sanitária que faz uso da velocidade e do preenchimento total ou parcial do canal de descarga pela água fornecida pelo aparelho de descarga, criando um efeito de sucção no poço, removendo os dejetos nela depositados. O efeito de sucção é interrompido quando ocorre o rompimento do selo hídrico do poço da bacia, acompanhado por seu ruído característico (item 3.5 - NBR 15097:2004).*

Obs.: a sugestão, nestes dois itens anteriores, é substituir a palavra “velocidade” por “quantidade de movimento” por entender tratar-se de um conceito mais amplo.

***Altura do fecho hídrico:** profundidade da camada líquida, medida entre o nível de saída e o ponto mais baixo da parede ou colo inferior do desconector, que separa os compartimentos ou ramos de entrada e saída deste dispositivo (item 3.1 - NBR 8160:1999).*

***Aparelho sanitário:** aparelho ligado à instalação predial e destinado ao uso da água para fins higiênicos ou a receber dejetos ou águas servidas (item 3.2 - NBR 8160:1999).*

***Bacia sanitária:** aparelho sanitário destinado a receber exclusivamente dejetos humanos (item 3.1 - NBR 8160:1999).*

Obs.: 1) no Brasil, também existe a denominação “vaso sanitário”

2) Pelo texto acima se conclui que não se deveria lançar, na bacia sanitária: absorventes, jornais, etc.

***Desconector:** dispositivo provido de fecho hídrico, destinado a vedar a passagem de gases no sentido oposto ao deslocamento de esgoto (item 3.14 – NBR 8160: 1999).*

Fecho hídrico: *camada líquida, de nível constante, que em um desconector veda a passagem de gases* (item 3.22 - NBR 8160:1999).

Obs.: na NBR 15097:2004, a definição de fecho hídrico tem a redação que inclui a *altura de 50mm* e exclui a denominação de *nível constante*, sendo necessária, portanto, uma uniformização das definições em normas.

Introdução

A preocupação com o consumo consciente de água para usos higiênicos tem se tornado uma busca constante dos pesquisadores nos dias atuais e a compreensão da hidráulica que envolve um dos equipamentos hidráulicos que mais consomem este precioso bem, ou seja, a bacia sanitária, será desenvolvida neste trabalho.

No mundo globalizado em que vivemos atualmente, torna-se importante o resgate de informações através de Institutos internacionais de pesquisas, complementando-se com pesquisas nacionais sobre o tema abordado, visando uma melhor compreensão da evolução dos sistemas hidrossanitários.

Na visão do usuário do equipamento bacia sanitária podem ocorrer incômodos causados por respingos quando do ato de defecar que, além do fato desagradável, abrem a possibilidade de contaminações e, conseqüentemente, doenças patogênicas gerando um aumento no gasto na Saúde Pública.

O encaminhamento dos dejetos ao longo do equipamento e do ramal de descarga tem sua eficiência aumentada se forem transformados em sólidos de menores proporções e a rotacionalidade no escoamento pode ser percebida como um auxílio importante para atingir este objetivo.

O encaminhamento tortuoso encontrado em vários modelos atuais de bacias sanitárias com base, principalmente, em resultados experimentais de fabricantes e, em menor proporção, de Institutos de pesquisa, ocasiona uma perda de energia considerável no escoamento e, por outro lado, se o circuito do trajeto for helicoidal estas perdas de cargas são minimizadas.

Outro aspecto importante a ser abordado em estudos hidráulicos é a suficiência do fecho hídrico do equipamento e seu respectivo sistema de ventilação, sendo ambos responsáveis por evitar odores desagradáveis no ambiente.

Um assunto muito discutido no meio acadêmico e estendido à população em geral é o volume consumido pela bacia sanitária; esta preocupação ganha importância, por exemplo, quando analisados os custos gerados do tratamento da água pelos Órgãos de Saneamento; no entanto, a discussão hidráulica deve avançar no sentido de também se analisar e especificar as durações com que este volume é descarregado no equipamento; por exemplo, utilizando-se volume de 6 litros (valor atual de consumo), se for descarregado na duração de 6 segundos ou de 6 minutos, tem-se comportamentos de picos de força de arraste nos sólidos totalmente diferentes, com evidente vantagem para o primeiro caso. Apesar do pensamento anterior ter sido levado a valor extremo, este ajuda na definição da menor duração como parâmetro importante a ser considerado.

Portanto percebe-se que, para verificações de desempenho de bacias sanitárias, torna-se necessário utilizar os conhecimentos de Mecânica dos Fluidos como ferramenta nas compreensões hidráulica envolvida.

Observação: Nas figuras oriundas de bibliografias internacionais, optou-se por manter as notações, sem traduções para o português, para não se mascarar a originalidade e por dificuldades de unificação de notação técnica.

1. Revisão bibliográfica

De acordo com o dicionário Aurélio [34], Engenharia “é a aplicação de conhecimentos científicos e empíricos, e certas habilitações específicas, à criação de estruturas , dispositivos e processos para converter recursos naturais em formas adequadas ao atendimento das necessidades humanas”, e dentro deste contexto, esta dissertação visa aliar desenvolvimentos empíricos e científicos aplicados a um modelo de bacia sanitária.

1.1 Pesquisas realizadas

A necessidade humana em eliminar de seu corpo substâncias tem feito com que a Humanidade, e os Engenheiros (em particular), ao longo da história, buscassem soluções para que este ato fosse feito da forma mais higiênica possível e dentro de um ambiente em que a intimidade fosse preservada.

Neste trajeto histórico, é recomendado à consulta ao Catálogo “Victorian Plumbing Fixtures” [70] onde vários modelos de aparelhos sanitários, de aproximadamente 100 anos atrás foram resgatados através de fotos e diagramas. Em termos históricos, pode-se obter informações curiosas também pelos sites: www.victoriacrupper.com [14]; www.sulabhtoiletmuseum.org [11] e www.plumbing.com [7] (este último com histórias do Egito, Grécia, Jerusalém, Pompéia, Roma, entre outros locais).

Uma retrospectiva acadêmica histórica importante foi realizada pelo prof. Francisco Landi [47], onde descreve a evolução dos Sistemas Hidráulicos e, neste caso, um salto qualitativo foi feito pois, além da pesquisa detalhada deste trabalho, o conceito de Sistema foi aplicado. Também é citada a primeira torre hidráulica com o propósito de simular um edifício de 3 andares (10 metros de altura), 8 metros de largura, com um coletor horizontal de 125mm de diâmetro conforme mostrado na Figura 1, mostrando o início das pesquisas aplicadas.

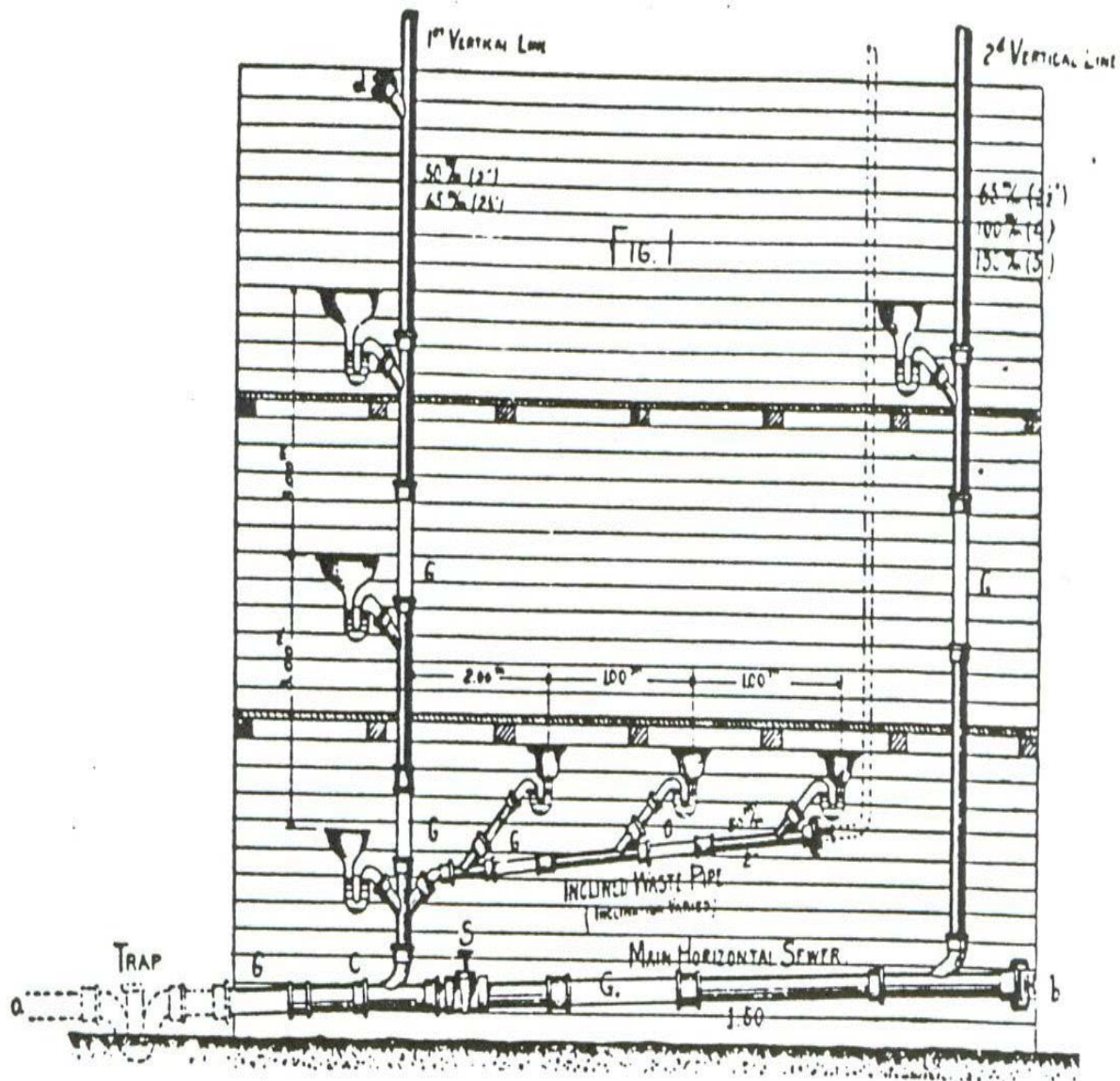


Figura 1: Torre hidráulica construída pelo Eng^o Herr Uma, da cidade de Colônia, em 1890 (Alemanha) – fonte: [47]

Pode-se complementar este trabalho com o artigo de Ilha [42], onde descreve sucintamente a evolução dos conhecimentos da área de Sistemas Hidráulicos, conforme Figura 2 a seguir.

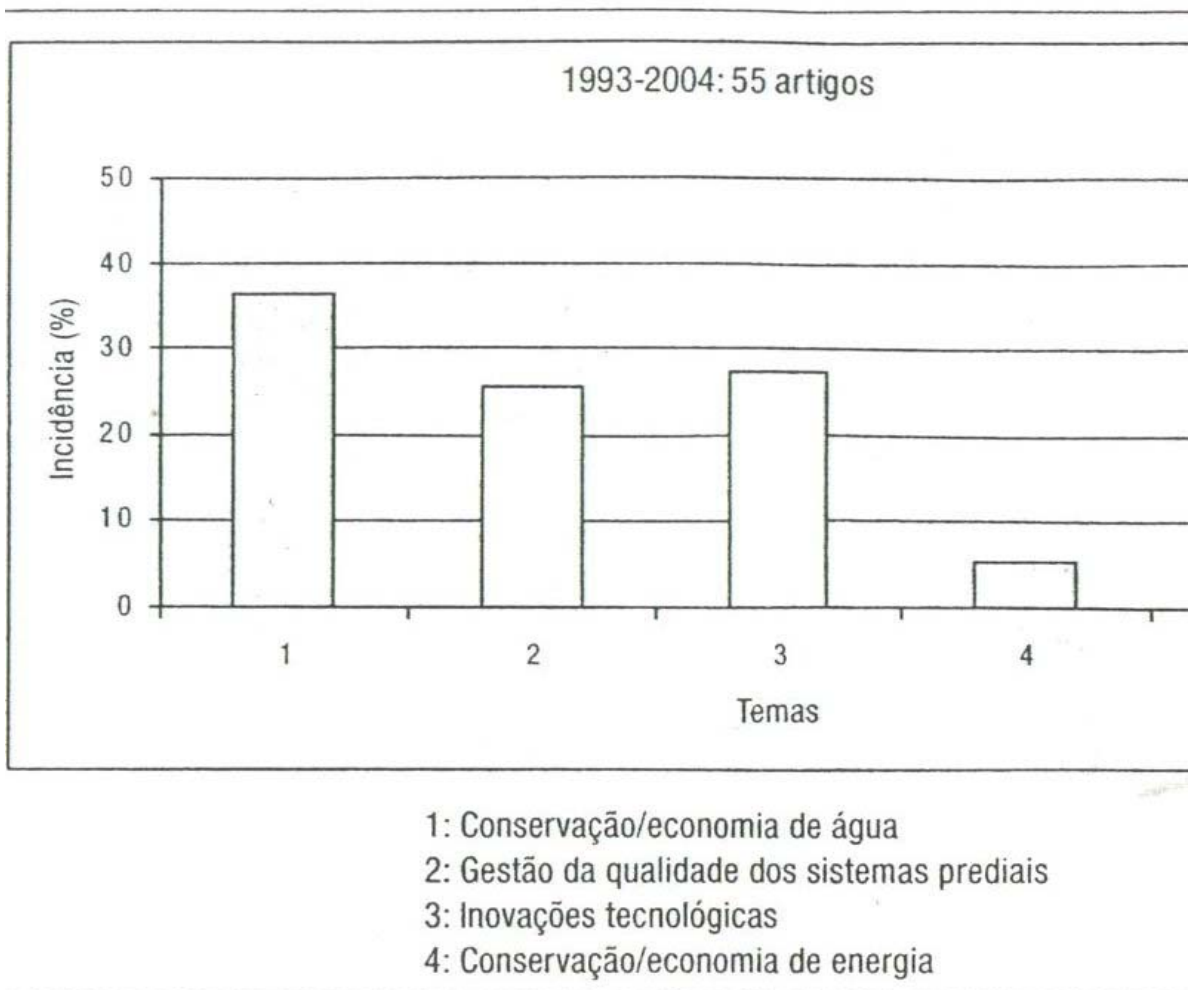


Figura 2: Evolução das Pesquisas de Sistemas Prediais no Brasil – fonte [42]

Em seu trabalho, dentro da disciplina “Qualidades e Inovações em Sistemas Prediais” na Escola Politécnica da USP, Marcellini & Ferreira [49], analisaram o “Sistema Equipamento Sanitário” de forma sistêmica e que será utilizado ao longo deste trabalho alinhado com o Projeto de Norma de Desempenho para Edifícios habitacionais de até 5 pavimentos 02:136.01-001/1 (parte 1) [25] e 02:136.01-001/6 (parte 6) [26], em fase de discussão pela Comissão de Estudos de Desempenho de Edificações da ABNT:

Vale a pena contextualizar a teoria dos sistemas: proposta em meados de 1950 pelo biólogo Ludwig von Bertalanffy, e sua importância é apresentada através numa visão diferente do reducionismo científico até então aplicado pela ciência tradicional (Bertalanffy, 1975) e retomado de forma exemplar por Russel L. Ackoff [19], em seu

livro “Redesigning the Future” (Ackoff, 1974), que resume que “sistema é um conjunto de partes que interagem entre si para funcionarem como um todo”.

Dentro do trabalho de Marcellini & Ferreira [49], obtêm-se os seguintes conceitos:

“Objetivo do sistema: facilitar o atendimento às necessidades dos usuários nas suas atividades de uso da água (higiene, afastamento dos dejetos e do esgoto sanitário);*

Funções do sistema: realizar a interface entre os usuários e o sistema hidrossanitário;

Topologia do sistema: constitui-se de aparelhos com capacidade de retenção e esgotamento de águas servidas provenientes das atividades humanas, que se interligam aos sistemas de suprimento de água e de coleta de esgoto sanitário.*

Percebemos, pelas descrições citadas, que se incluem aqui as pias de cozinha, lavatórios, mictórios, banheiras, bidês e bacias sanitárias.

() Obs: Atualmente já existem no mercado equipamentos sanitários que não utilizam água em sua operação como, por exemplo, os mictórios sem água (estudos realizados por Schmidt, William [64] conforme citado por Graça [39] em artigo da revista Hydro de 02/2008), mas por simplificação, consideraremos neste trabalho apenas os equipamentos mais tradicionais, que dominam o mercado e utilizam a água para seu funcionamento. “*

O conceito de usuário neste trabalho adquire também uma visão expansionista, entendendo-se como quem ou o que recebe influência do sistema, quando em uso deste.

Dentro desta visão expansionista, vale citar o conceito de Desempenho segundo Wyly e Galowin, citado em Graça [39]:

“a chave para o desenvolvimento de padrões de desempenho, critérios significativos, que caracterizam o desempenho esperado é a identificação e a subsequente geração de metodologias para medir como estes produtos, processos e sistemas aderem aos critérios”,

Da mesma forma, o desempenho de componentes:

“liga-se à durabilidade e à capacidade de parte de um sistema realizar sua função e, conseqüentemente, contribuir para que o sistema também permaneça em funcionamento adequado, durante o período de utilização a ser considerado”

e o desempenho dos sistemas:

“liga-se diretamente à compatibilização dos sistemas às exigências dos usuários, independentemente dos componentes a serem utilizados.”

Conclui-se que é através da determinação das necessidades dos usuários, relacionadas às atividades em que interagem com o sistema a ser analisado, que pode-se determinar os padrões de desempenho desejados, desenvolvendo-se novas tecnologias em todos os campos da ciência, conforme citado em Gonçalves – revista Hydro 02/2008 [36].

Interessante notar que, em 1852, o Board of Health of England já dava indícios do conceito de desempenho, solicitando nas bacias sanitárias, conforme Landi [47]:

- Remoção completa dos resíduos;
- Sifão que evite retorno de odores;
- Consumo da menor quantidade de água possível para uma perfeita lavagem e manutenção do sifão;
- Durabilidade ou garantia contra entupimento, quebra, etc.
- Fácil manutenção;
- Baixo custo quando produzida em larga escala.

Marcellini & Ferreira [49] elaboraram a tabela resumo que relaciona os Grupos de Usuários e os Desempenhos / Requisitos do Sistema Bacia Sanitária, com indicação de grau de relevância: E = Elevado, R = Reduzido ou N = irrelevante em cada caso:

Tabela 1: Grupos de Usuários e os Desempenhos / Requisitos do Sistema, com indicação de grau de relevância (obs.: PNE = pessoas com necessidades especiais) – fonte [49]

NECESSIDADES E REQUISITOS	GRUPOS DE USUÁRIOS																
	Moradores Ed Residenciais				Públicos c/ WC privativo		Usuários de WCs não privativos				Resp pela limpeza		Não ocupantes		Indiretos		
	Adultos	Crianças	Idosos ou PNEs	Animais de estimação	Adultos	PNEs	Pacientes de hospital	Adultos	Idosos	PNEs	Crianças	Residências	Ed Públicos e comerciais	Construtores e instaladores	Eq. manutenção	proprietários	vizinhos
	1.1.1	1.1.2	1.1.3	1.1.4.	1.2.1	1.2.2	1.2.3	2.1	2.2	2.3	2.4	3.1	3.2	4.1	4.2	4.3	5.0
Segurança Estrutural																	
Resistência mecânica quando do uso	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	R	R	R	R	R	N	
Resistência mecânica quando do transporte e instalação	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	E	E	E	E	R	N	
Segurança no uso e operação																	
Sem rebarbas ou partes cortantes	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	R	N	
Peso adequado para manuseio por uma pessoa	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	R	R	E	E	R	N	
Estanqueidade																	
Sem vazamentos durante o uso	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	R	
Conforto acústico																	
Nível de ruído imperceptível fora do ambiente de uso	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	R	R	R	R	R	E	
Saúde, higiene e qualidade do ar																	
Sem odores durante o uso	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	R	R	R	R	E	R	
Sem contaminação biológica ao usuário	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	R	
Funcionalidade e acessibilidade																	
Abastecimento de água na quantidade adequada ao uso	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	R	

Graus de relevância: E = Elevado, R = Reduzido ou N = Irrelevante

Tabela1 – continuação - Grupos de Usuários e os Desempenhos / Requisitos do Sistema, com indicação de grau de relevância (obs.: PNE = pessoas com necessidades especiais) – fonte [49]

Dimensionamento das tubulações de esgoto adequadas para retiradas de dejetos para fora do edifício	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	R
Conforto tátil e antropodinâmico	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	R
Ergonomia adequada ao uso	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	R	R	R	R	R	N
Temperatura de contato adequada para uso	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	R	R	R	R	R	N
Durabilidade e manutenibilidade	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	R
Mínimos recursos necessários para manutenção	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	E	E	E	E	N
Adequação ambiental	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	R
Reduzido uso de recursos naturais no uso e eliminação dejetos	E	E	E	E	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	N
Estética	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	R
Atendimento aos padrões de estética dos usuários	E	E	E	E	R	R	R	N	N	N	N	N	N	N	E	N

Graus de relevância: E = Elevado, R = Reduzido ou N = Irrelevante

Uma colaboração importante, e base de pesquisas atuais, foi realizado por Ujamhan – Brunel University [72], onde, de forma exaustiva, vários ensaios relacionando-se os parâmetros de bacias sanitárias. Outro destaque deste trabalho, dentro da visão sistêmica, é a preocupação com o ramal de descarga do equipamento sanitário, onde o autor descreve três zonas de encaminhamento dos sólidos e as respectivas forças atuantes, conforme mostrado na Figura 3.

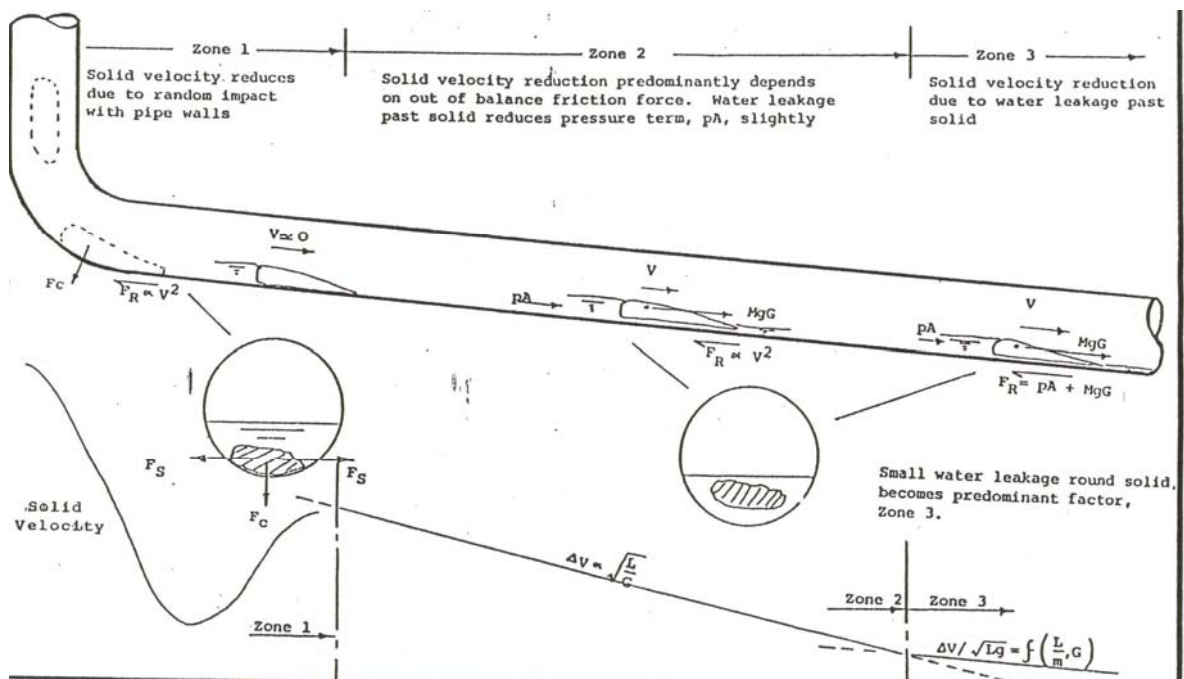


Figura 3: Forças atuantes na tubulação de saída da bacia sanitária (Ujamhan – Brunel University [72])

Na Figura 4, Ongoren [58] detalha as forças atuantes no sólido, onde nota-se a complexidade do equacionamento físico.

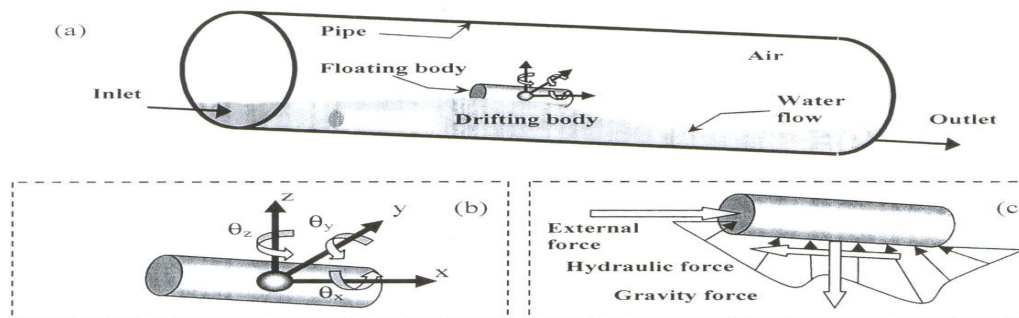


Figura 4: Detalhe das forças atuantes no sólido, na tubulação de saída da bacia sanitária (citado em Ongoren et al. [58])

No Brasil, merece destaque o trabalho realizado por Rocha [61], ensaiando alguns modelos brasileiros de bacias sanitárias, definindo também parâmetros para auxiliar em pesquisas futuras. Entre estes parâmetros, os que são utilizados, de forma direta ou indireta, neste trabalho são:

- vazão de entrada na bacia;
- coeficiente de perda de carga na argola;
- vazão de saída da bacia;
- volume do poço;
- dimensões que caracterizam quantitativamente a superfície visível do poço;
- menor dimensão interna do sifão e sua posição.

Também neste trabalho, são definidos os desempenhos desejados no sistema bacia sanitária:

- *que a superfície interna da bacia, desde a argola (parte superior da bacia sanitária onde é lançada água para limpeza da parede interna) até a superfície de água no poço, seja lavada;*
- *que os dejetos removidos sejam transportados ao longo do ramal de descarga;*
- *que não ocorram respingos para fora da bacia sanitária durante a descarga (e do ato de defecar – grifo meu) para evitar contágio de bactérias que possam estar contidas no poço da bacia ou até na utilização da mesma;*
- *a manutenção do fecho hídrico no poço da bacia sanitária.”*

Recentemente, os jornais de grande circulação vêm divulgando artigos relacionados à economia de água e o atendimento para portadores de necessidades especiais (OESP [17] e [18]). Apesar de não conter os rigores científicos, os artigos em jornal auxiliam na divulgação da preocupação do tema dos pesquisadores.

A busca de economia de água também levou pesquisadores do IPT a se preocuparem com o assunto de forma sistêmica, com todos os envolvidos na economia de água e publicarem artigos na Revista construção, no encarte Tecnologia das Edificações, na década de 1980, onde pode-se citar Montenegro [51]:

(...) a economia de água no interior de uma edificação é resultado de um processo de tomada de consciência que precisa ser dinamizado e onde fabricantes, usuários, companhias de saneamento e entidades normalizadoras têm um papel fundamental. Não deve o nosso país continuar a desperdiçar este bem tão precioso e cada vez mais escasso que é a água.

Em artigos científicos, vale citar Okamura [56], que realizou testes na Escola Politécnica da USP e o artigo adaptado por Ilha [43] sobre sistemas de descargas acionadas de forma eletrônica ambos visando à economia de água.

Também é interessante notar as tentativas de redução da quantidade de água para limpeza do sistema por vácuo, com artigo citado na revista WPR [59] e o uso de vácuo em aparelhos espaciais (portal Terra [16]).

Digno de nota são as reuniões realizadas pelo CIB¹ desde setembro de 1972, discutindo com pesquisadores de vários países, questões relativas aos sistemas hidrossanitários, sendo que, nos últimos 10 anos, foram publicados 360 artigos, utilizando-se 863 palavras-chaves. Em pesquisa à biblioteca do PURA, obteve-se as dez palavras-chaves mais citadas e que serão utilizadas neste estudo, de forma direta ou indireta:

Tabela 2: Palavras-chaves mais citadas nos últimos dez anos no CIB W062 (fonte: PURA – USP)

Palavra chave	Número de citações nos últimos 10 anos (1999 – 2008)
Conservação da água	23
Sistema de esgoto sanitário	17
Consumo de água	14
Simulações	11
Modelagens	10
Construções residenciais	10
Fecho hídrico	10
Consumo de água quente	9
Abastecimento de água	9
Simulação Monte Carlo	8

¹ CIB - International Council for Research and Innovation in Building and Construction

2. Estudos Hidráulicos do sistema bacia sanitária

O entendimento da parte hidráulica torna-se importante e percebe-se que poucos trabalhos foram realizados neste sentido, sendo que esta escassez pode ser explicada, em parte, pela dificuldade de modelagem matemática do sistema interno da bacia sanitária.

Para começar a pensar sobre comportamentos hidráulicos, é interessante definir as dimensões do aparelho e neste sentido, a pesquisa feita por Wendt [73] merece uma atenção, pois discute estas dimensões para um público feminino, com abrangência das dificuldades das usuárias para o uso. Também neste trabalho é citada a dificuldade em obter informações sobre o ato de utilizar este aparelho dada à intimidade que o envolve.

A partir do trabalho de Mendes [50], este trabalho irá analisar a bacia sanitária sob o olhar hidráulico, complementando o trabalho citado.

Não poderia ser deixada de lado a NBR 15099/2004 [24], com algumas observações:

- as bacias não possuem formas definidas, apenas nas principais dimensões, proporcionando “liberdade” às pesquisas de forma do equipamento;
- diâmetros de entrada e saídas com valores fixos, sem a possibilidade de novos diâmetros, se hidraulicamente justificados.

No Brasil, em termos de avaliação de desempenho, é importante citar o papel do PBQP-H [3](Programa Brasileiro da Qualidade e Produtividade no Habitat), com foco específico para o estudo em questão em “Louças Sanitárias em Sistemas Prediais”, iniciado em 1998 e atualmente com alto índice de conformidade nos modelos (96,1% em fevereiro a abril /07), com ensaios através da autoria independente Tesis, sendo um dos fatores da confiabilidade e continuidade deste programa, tendo por base a norma brasileira NBR 15097:2004. Sobre este tema vale citar Gonçalves [36]:

“ O processo de desenvolvimento e implantação no mercado brasileiro da bacia sanitária de 6 l é referência. A trajetória adotada pelo PBQP-H (Programa Brasileiro da Qualidade e Produtividade no Habitat) foi a ideal, e deu certo: contou com uma política nacional para o uso racional da água aliada a instrumentos sociais. Foram criados mecanismos e compromissos para que, em quatro anos, o produto estivesse disponível no mercado. Hoje, todas são de 6 l. Houve, portanto, um processo político de articulação de agentes sociais, embasamento técnico por parte das empresas e da academia. E ainda foram criadas normas técnicas.”

Também é digno de nota o trabalho recente da Avaliação Técnica do Proacqua [9] visando um olhar sistêmico sobre as inovações hidráulicas., conforme Figura 5, a seguir:

Programa Proacqua

www.proacqua.org.br
www.cediplac.org.br



Figura 5: Atuações do Proacqua (apud Gonçalves in Seminário: “Conservação, Uso Múltiplo e Reuso de Água em Saneamento Básico”)

A seguir, a Tabela 3 comparativa entre os ensaios previstos na Norma Brasileira, Canadense e Americana, citado em Ilha et al.:

Tabela 3: Tabela comparativa dos ensaios previstos nas Normas Brasileira, Canadense e Americana, citado em Iha [42].

Ensaio para a Avaliação do Desempenho Funcional		
ASME	CSA	NBR
<ol style="list-style-type: none"> 1. Remoção de esferas (“<i>Ball test</i>”); 2. Remoção de grânulos (“<i>Granule test</i>”); 3. Lavagem de parede (“<i>Washing of flushing surface test</i>”); 4. Troca de água (“<i>Dye tests</i>”); 5. Consumo de água (“<i>Water consumption test</i>”); 6. Determinação da altura do fecho hidrico (“<i>Trap seal depth determination test</i>”); 7. Reposição do fecho hidrico (“<i>Trap seal restoration test</i>”); 8. Transporte de sólidos (“<i>Drainline transport characterization</i>”); 9. Ascensão de água no interior da bacia (“<i>Water rise test</i>”); 10. Respingos de água (“<i>Rim top and seat fouling test</i>”). 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Troca de água (“<i>Water change capability</i>”); 2. Lavagem de parede (“<i>Flushing surface</i>”); 3. Remoção de grânulos (“<i>Carry-out capability – Test 1</i>”); 4. Remoção de papel <i>Kraft</i> (“<i>Carry-out capability – Test 2</i>”); 5. Remoção de esponjas de poliuretano (“<i>Carry-out capability – Test 3</i>”); 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Remoção de papel; 2. Remoção de esferas; 3. Lavagem de parede; 4. Troca de água; 5. Reposição do fecho hidrico; 6. Respingos de água; 7. Transporte de sólidos; 8. Resistência do fecho hidrico à retropressão.
Classificação das Bacias Sanitárias		
<ol style="list-style-type: none"> 1. “<i>Conventional type</i>”: volume médio de descarga superior a 13,5 litros; 2. “<i>Water-saving type</i>”: volume médio de descarga inferior a 13,5 litros; 3. “<i>Low-consumption type</i>”: volume médio de descarga inferior a 6,0 litros. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. “<i>Conventional type</i>”: volume médio de descarga superior a 13,25 litros; 2. “<i>Water-saver type</i>”: volume médio de descarga inferior a 13,25 litros; 3. “<i>Low-consumption type</i>”: volume médio de descarga inferior a 6,0 litros. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Convencional: volume médio de descarga entre 9 e 12 litros; 2. Baixo consumo: volume médio de descarga entre 6 e 9 litros; 3. Volume de descarga reduzido (VDR): volume médio de descarga inferior a 6,0 litros.

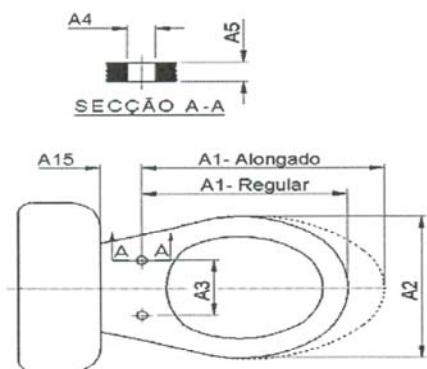


Figura 5 — Planta da bacia com caixa acoplada

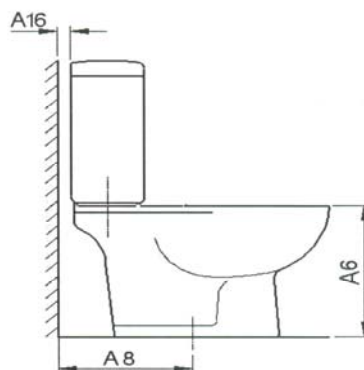


Figura 6 — Corpo da bacia com caixa acoplada

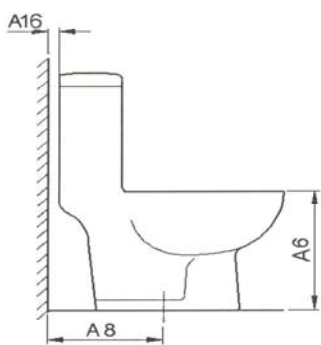


Figura 7 — Corpo da bacia monobloco

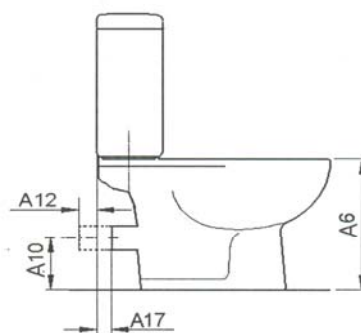


Figura 8 — Corpo da bacia com caixa e saída horizontal

Figura 6: Dimensões padronizadas constantes na NBR 15099:2004 [24]

Também torna-se interessante comparar a NBR 15099:2004 [24] com alguns modelos internacionais:

Tabela 4: Comparação entre valores dimensionais (mm) de bacias sanitárias (fontes: [23], [13], [12], [15],[10],[50])

Código NBR 15099	<i>A2</i>	<i>A3</i>	<i>A6</i>	<i>A8</i>	<i>A16</i>
Valor NBR 15099 (mm)	375 +- 25	150+- 10	Mínimo 345	300+-10	Máximo 30
Modelo: Wellworth	Maior que 251	-	381	305	25
Marca: Kohler					
País: USA - Canadá					
Modelo: Aquia	360	140	390	305	6
Marca: Toto					
País: USA					
Modelo: Eco Drake	355	140	420	305	30
Marca: Toto					
País: USA					
Modelo: Z5575	375	140	391	305	13
Marca: Zurn					
País: USA					
Modelo: Neorest 600	436	-	413	305	16
Marca: Toto					
País: USA					
Modelo: Victoria	350	160	385	210	-
Marca: Roca					
País: Nova Zelândia					
Modelo: Dama Compacta	355	160	385	210	-
Marca: Roca					
País: Polônia					
Modelo proposto por Mendes (Brasil)	258	-	380	300	-

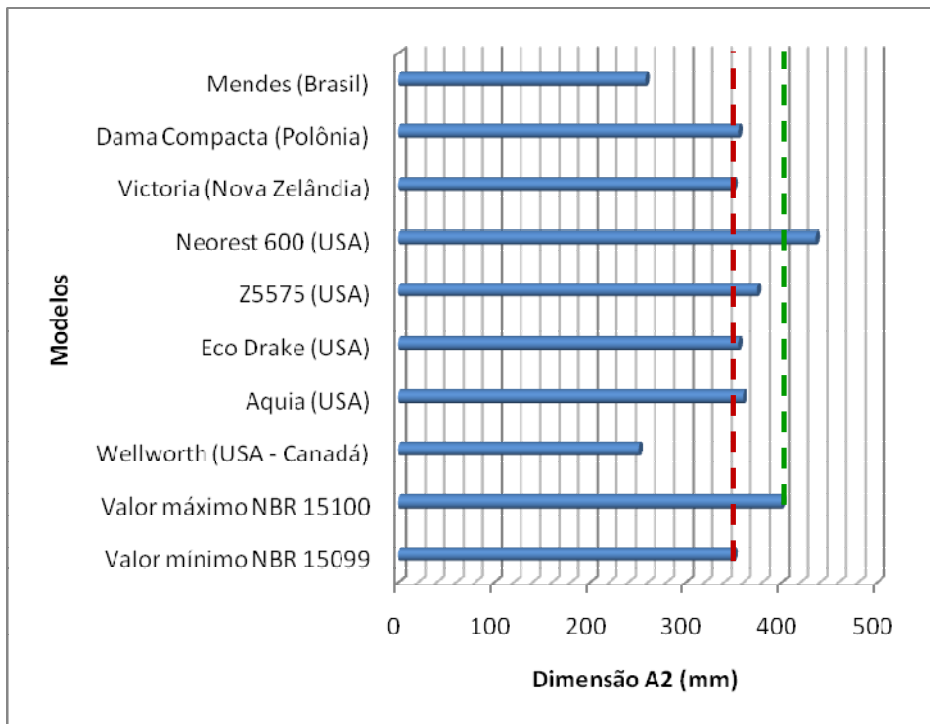


Figura 7: Correspondência entre os valores A2 citados na NBR 15099 e os valores de modelos de bacias sanitárias internacionais (fontes: [23], [13], [12], [15],[10],[50])

Na Figura 7, conclui-se que os valores dos modelos de Mendes (Brasil) e Wellworth (USA – Canadá) encontram-se abaixo do valor mínimo da NBR 15099:2004 e o modelo Neorest 600 (USA) encontra-se acima do valor máximo da NBR 15099:2004.

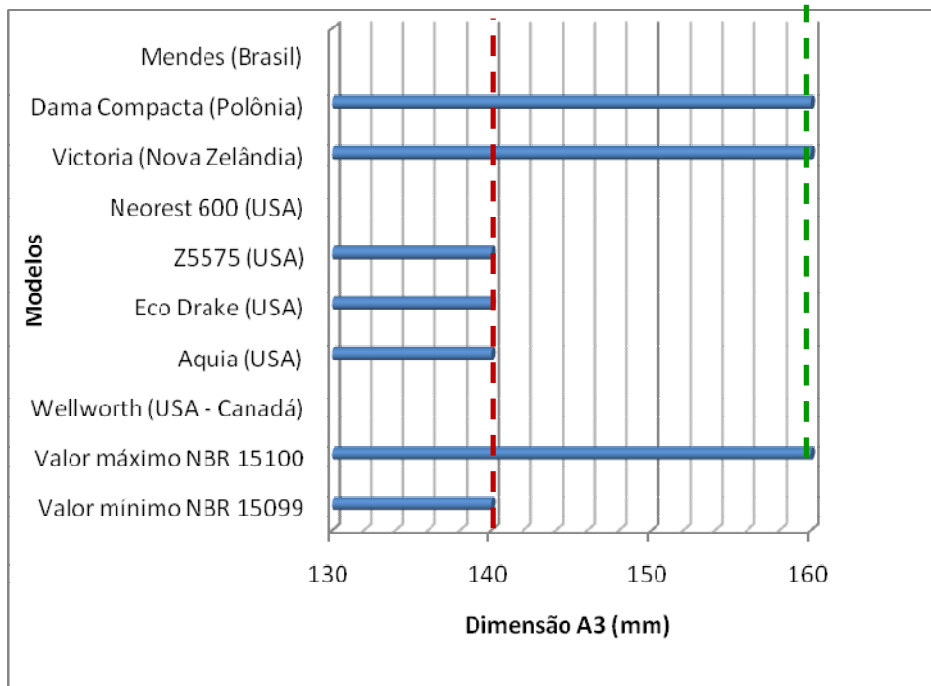


Figura 8: Correspondência entre os valores A3 citados na NBR 15099 e os valores de modelos de bacias sanitárias internacionais (fontes: [23], [13], [12], [15],[10],[50])

Na Figura 8, conclui-se que os valores dos modelos encontram-se dentro dos valores mínimo e do valor máximo da NBR 15099:2004, sendo que os demais fabricantes citados não forneceram as dimensões A3 em seus sites.

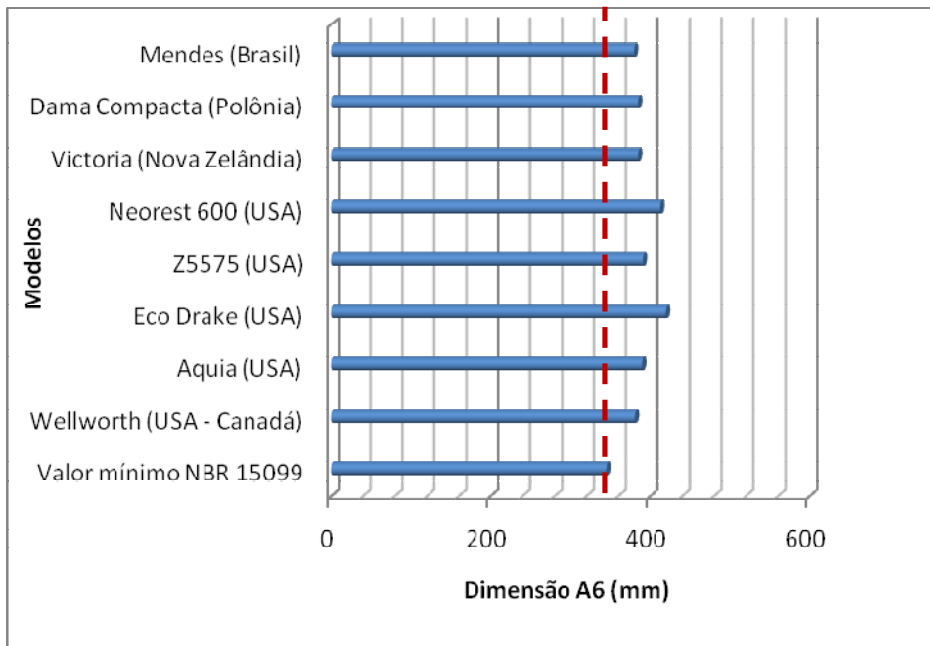


Figura 9: Correspondência entre os valores A6 citados na NBR 15099 e os valores de modelos de bacias sanitárias internacionais (fontes: [23], [13], [12], [15],[10],[50])

Na Figura 9, conclui-se que os valores dos modelos encontram-se dentro dos valores mínimo e do valor máximo da NBR 15099:2004.

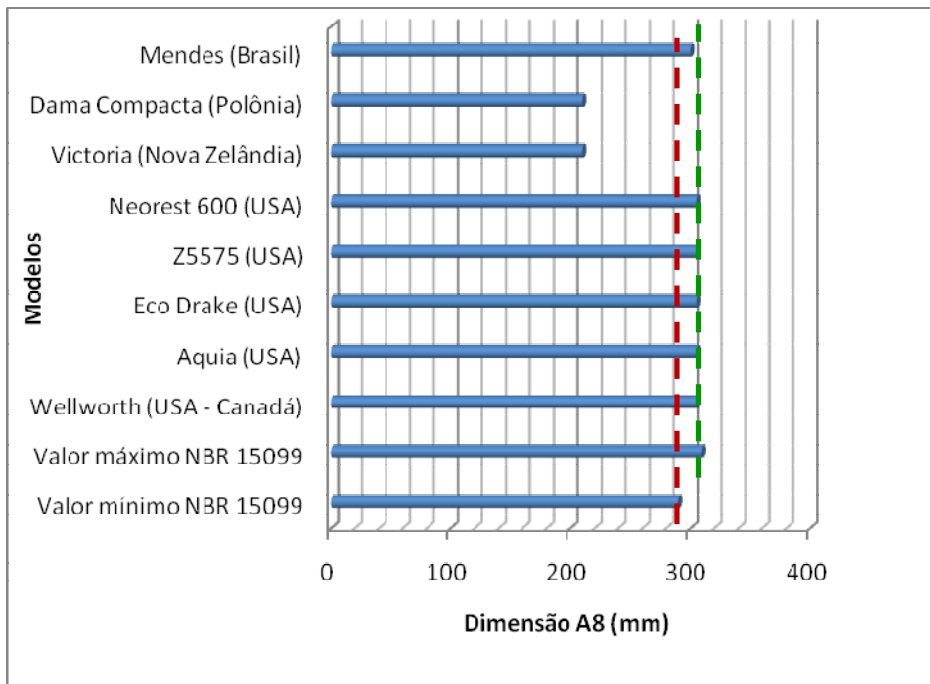


Figura 10: Correspondência entre os valores A8 citados na NBR 15099 e os valores de modelos de bacias sanitárias internacionais (fontes: [23], [13], [12], [15],[10],[50])

Na Figura 10, conclui-se que os valores dos modelos de Victoria (Nova Zelândia) e Dama Compacta (Polônia) encontram-se abaixo do valor mínimo da NBR 15099:2004 e todos os modelos analisados encontram-se dentro do valor máximo da NBR 15099:2004.

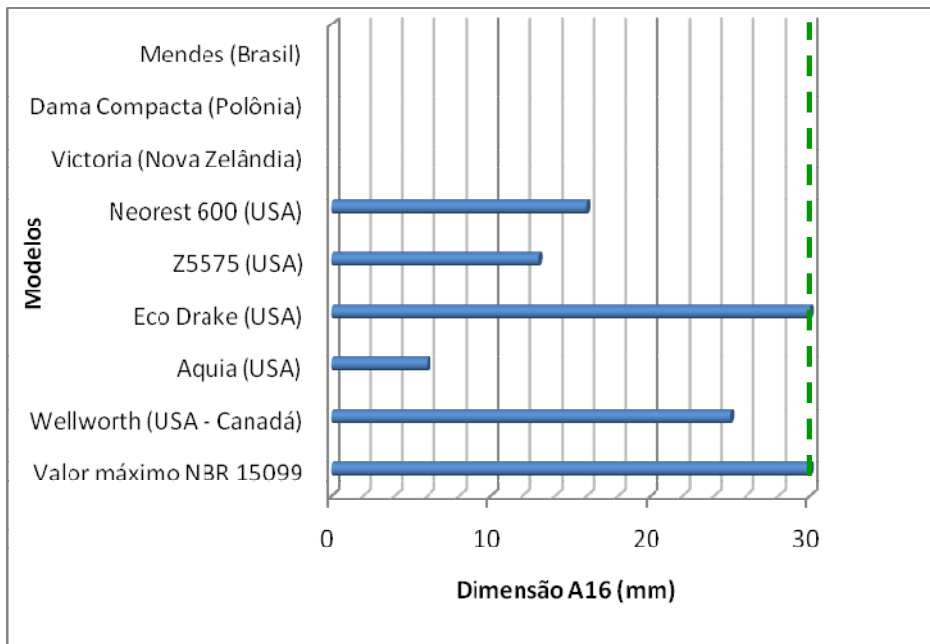


Figura 11: Correspondência entre os valores A16 citados na NBR 15099 e os valores de modelos de bacias sanitárias internacionais (fontes: [23], [13], [12], [15],[10],[50])

Na Figura 11, conclui-se que todos os modelos analisados encontram-se dentro do valor máximo da NBR 15099:2004.

Os modelos escolhidos dos USA foram selecionados a partir da classificação da CUWCC [5]⁽²⁾, com os melhores índices de desempenho e que indiquem uma economia de água, percebendo-se um alinhamento entre os valores citados, sendo que a marca Roca esta presente entre vários países, entre eles o Brasil.

² CUWCC – California Urban Water Conservation Council – Órgão governamental composto de 22 organizações (17 do Canadá e 5 dos USA) que testam modelos de bacias sanitárias nestes países através do Maximum Performance – MAP™, e na 11ª edição testou mais de 600 diferentes modelos.

2.1 Cálculo simplificado da distância borda-poço

Wendt [73] citou, em seus respectivos estudos, o desconforto causado pelos respingos originários pela queda do sólido no poço da bacia sanitária quando em uso pelo público feminino. Também comentou o fato do desconforto dos comentários deste assunto pela população em geral. No item a seguir será equacionada a distância borda-poço para evitar este incômodo, através do estudo do efeito “Splash”.

2.1.1 O efeito Splash³

Wendt [73] citou, em seus respectivos estudos, o desconforto causado pelos respingos originários pela queda do sólido no poço da bacia sanitária quando em uso pelo público feminino. Também comentou o fato do desconforto dos comentários deste assunto pela população em geral.

A formulação do efeito Splash, foi iniciado há mais de 100 anos, através dos estudos de Worthington [74] e trata-se de um fenômeno complexo, podendo-se ser resumido na figura abaixo, citado em Bizotto [29]:

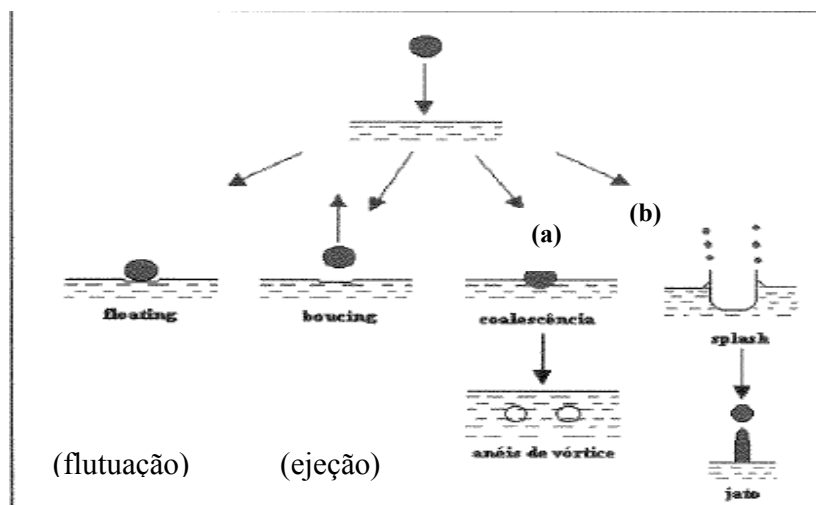


Figura 12: Queda de objeto em uma superfície líquida: no caso (a) forma-se vórtices e no caso (b) existe a formação de jatos (citado em Bizotto[29])

³ Neste trabalho, manteve-se o termo em Inglês “Splash” por não se encontrar um termo equivalente em Português que represente o fenômeno, além deste termo já ter sido utilizado em bibliografias nacionais mantendo a simbologia inglesa.

De acordo com Bizotto:

No caso do “floating”, a gota flutua na superfície por diversos segundos e então desaparece e, no processo de “bouncing” a gota não é capturada pela superfície de impacto.

O processo da coalescência no impacto da gota está relacionado à formação de um anel de vórtice que se propaga no líquido alvo. Imediatamente depois do impacto, uma cavidade é formada e o líquido da gota se expande sobre a superfície de impacto. Conseqüentemente, a cavidade se fecha e um anel de vórtice se propaga para o interior do líquido alvo se desenvolvendo em tamanho, enquanto é desacelerado.”

Em termos comparativos, a viscosidade da água pode ser calculada através da Equação 1 abaixo (Binghan, apud Roma [62]):

$$\frac{1}{\mu} = 10 \left\{ 2,1482 \left[(t - 8,435) + \sqrt{8078,4 + (t - 8,435)^2} \right] - 120 \right\} \quad \dots \text{(Equação 1)}$$

μ = viscosidade absoluta do líquido alvo [Pa . s]

t = temperatura do líquido alvo [°C]

Calculando-se para t = 20°C e o valor em [Pa.s], tem-se:

$$\mu = 0,1 \left\{ 2,1482 \left[(20 - 8,435) + \sqrt{8078,4 + (20 - 8,435)^2} \right] - 120 \right\}^{-1} \Rightarrow \mu = 0,00100487 Pa.s$$

Pode-se obter o valor da viscosidade absoluta através do gráfico abaixo(Fox [35]):

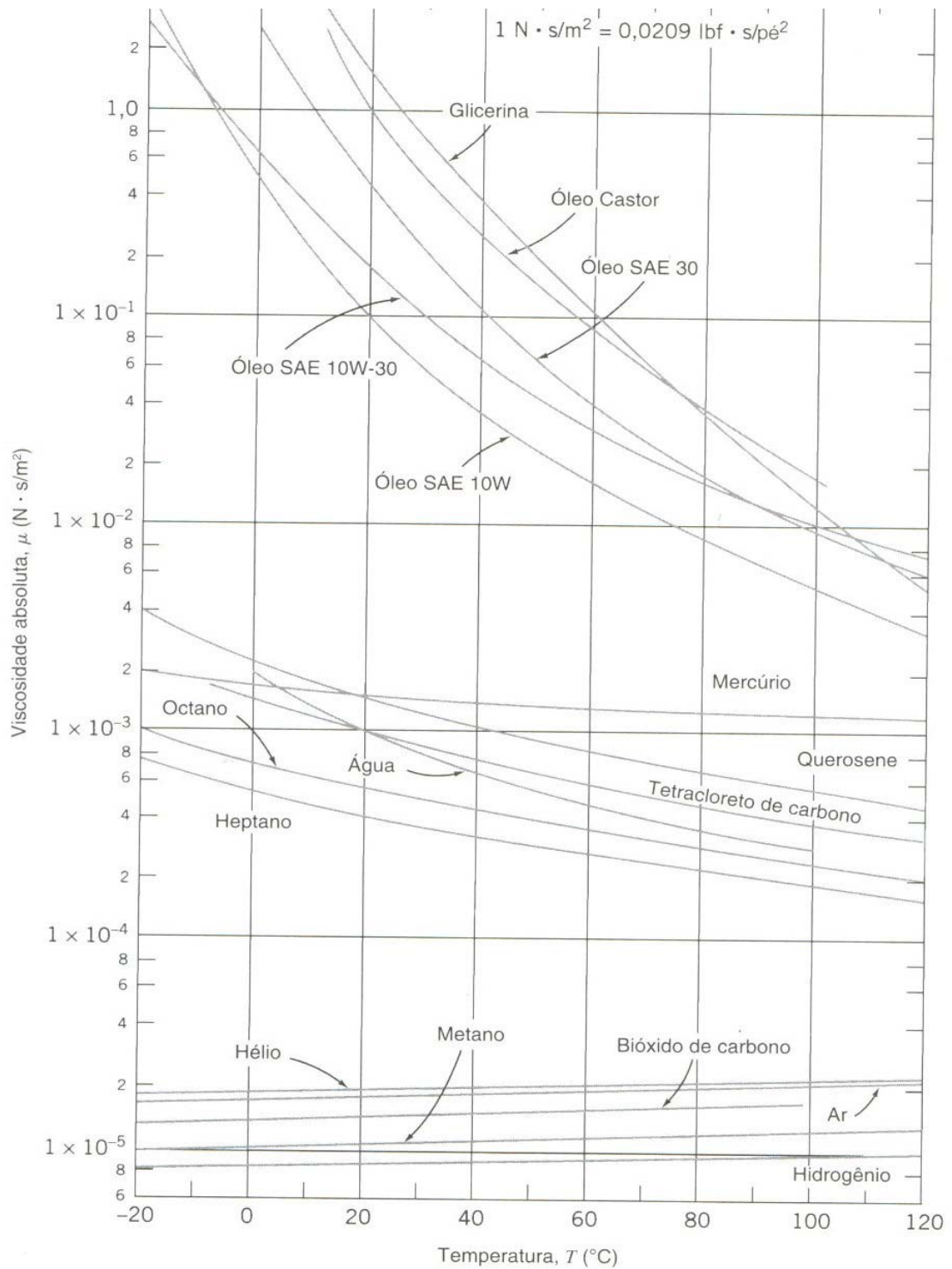


Figura 13: Gráfico Viscosidade Absoluta (Pa · s) x Temperatura (°C) (fonte: Fox [35])

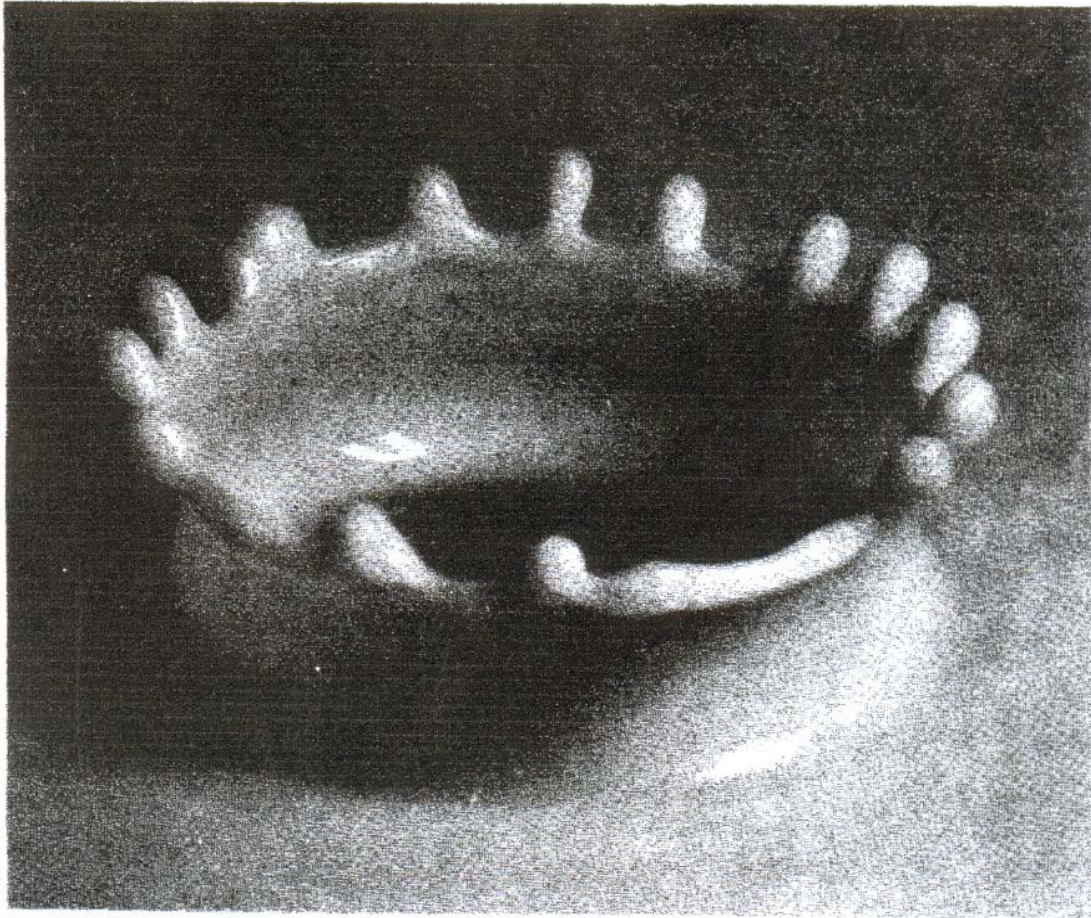


Figura 14: Queda de objeto em um líquido (leite) – efeito Splash (fonte: [44])

Para exemplificar o fenômeno, recorre-se à figura 14 nota-se a formação de uma coroa imediatamente após a queda, formando-se, a seguir, os jatos citados no item “b” da Figura 12.

Nigen [55] estudou o comportamento de vários objetos quando em queda em um líquido de viscosidade absoluta $\mu = 0,75 \text{ Pa.s}$, através da Figuras 15, 16, 17 e 18, resumidos através da Tabela 5. Cheny [31] estudou o comportamento de queda de uma gota de água em uma superfície de água, conforme demonstrado na Figura 19.

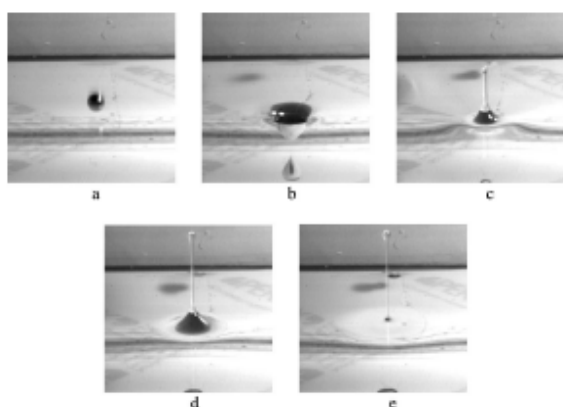


Figura 15: Variação da superfície de líquido devido à queda de uma esfera de tungstênio (fonte: Nigen [55])

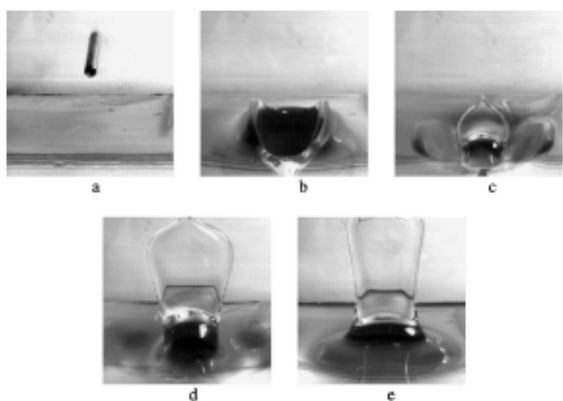


Figura 16: Variação da superfície de líquido devido à queda de uma pequena barra de alumínio (fonte: Nigen [55])

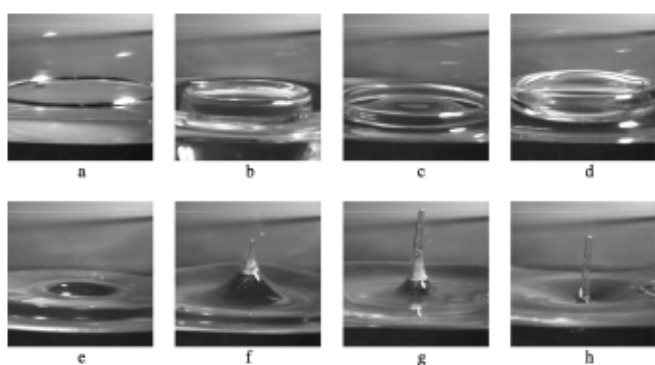


Figura 17: Variação da superfície de líquido devido à queda de anel de alumínio em superfície de viscosidade = 0,75 Pa.s (fonte: Nigen [55])

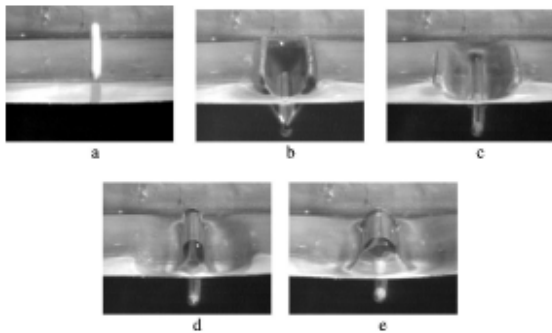


Figura 18: Variação da superfície de líquido devido à queda de uma pequena barra de madeira (fonte: Nigen [55])

Tabela 5: Resumo das características dos objetos ensaiados por Nigen [55]

<i>Características dos objetos ensaiados</i>				
Material	Densidade (mg / mm³)	Diâmetro (D) (mm)	Comprimento (L) (mm)	L / D
Esfera tungstênio	14,94	6 , 8 , 10	-	-
Pequena barra				
Alumínio	7,30	8	80	10
Madeira	1,35	8	80	10
Barra longa				
Alumínio	7,3	6	500	83
Ferro	7,8	6 , 8, 10 , 9,4	330 , 530	55, 41, 33, 56
Vidro	2,2	8	303	38
Madeira	1,35	8	520	65
Anel Alumínio	7,3	6,4	D _{interior} = 14,6 mm	D _{interior} = 14,6 mm

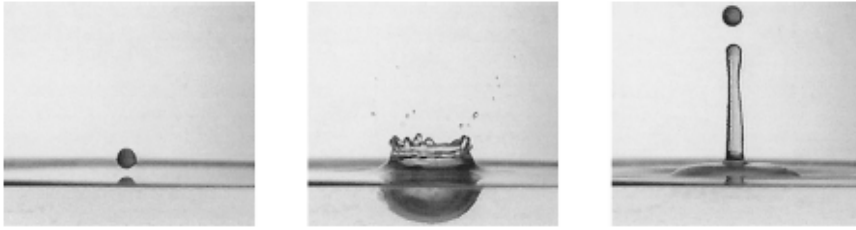


Figura 19: Variação da superfície por uma queda de uma gota de água na água (fonte: Cheny [31])

Pode-se simplificar esta questão através dos estudos de Alkschbirs [20][21] com base em Hsiao [45], definindo-se um número de Weber crítico próximo de 8, lembrando-se que o Número de Weber é a razão entre as forças de inércia e de tensão superficial, ou seja:

$$We_c = U \sqrt{\frac{\rho D}{\sigma}} \quad \dots \text{(Equação 2)}$$

onde:

$We_c = \sqrt{57}$ = limite de formação de vórtice para formação de jatos, para 20°C;

U = velocidade de queda do objeto [m/s];

ρ = massa específica da superfície alvo (poço) [kg/m³];

D = dimensão característica do objeto [m];

σ = tensão superficial da água [N/m].

Em estudos de 2003, Manzello [48] et al. relacionaram o número de Weber com a temperatura do fluido do poço, conforme Figura 20, onde nota-se que o valor definido por Manzello é o valor ao quadrado definido por Hsiao:

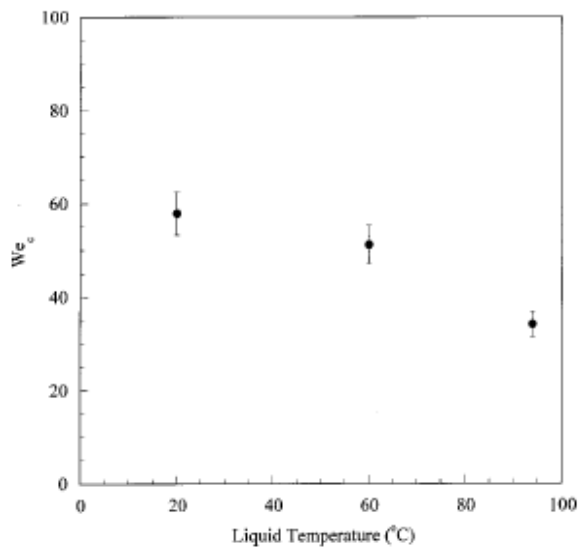


Figura 20: Relação entre o número de Weber crítico e a temperatura do líquido alvo (fonte: Manzello [48]).

A velocidade de queda pode ser calculada através da Conservação de Energia:

$$mgh = \frac{mU^2}{2} \Rightarrow U = \sqrt{2gh} \quad \dots \text{(Equação 3)}$$

onde:

U = velocidade de queda do objeto [m/s];
 m = massa do objeto [kg];
 g = aceleração da gravidade [m/s²];
 h = altura de queda [m].

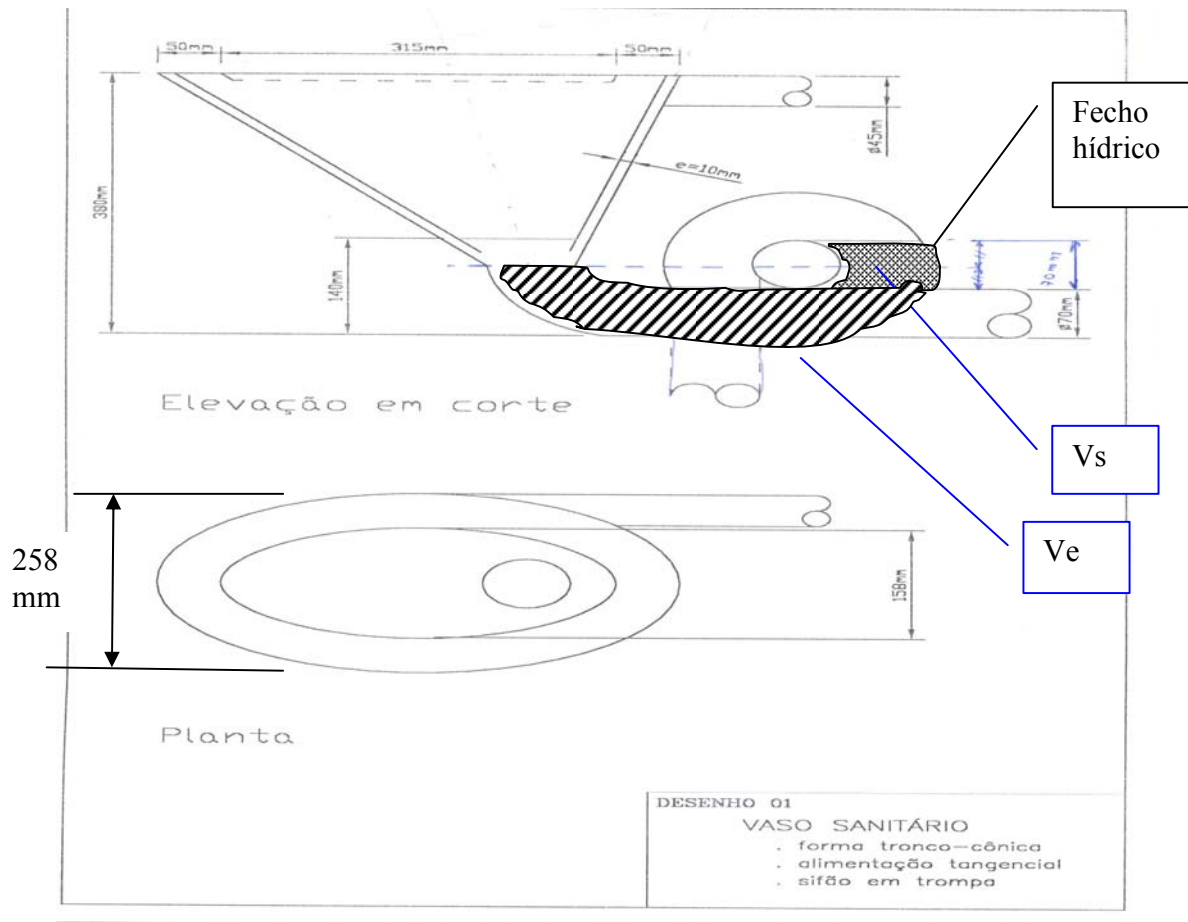


Figura 21: Modelo de Mendes [50] para o estudo em questão (valores em caneta foram colocados por esta Dissertação para auxílio nos cálculos)

Utilizando-se os valores nos croquis de Mendes [50], conforme Figura 21:

$$U = \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot (0,38 - 0,14)} \Rightarrow U = 2,17 \text{ m/s}$$

Calculando-se o Número de Weber para uma dimensão característica de 0,05m (2") – estimado, $\rho = 998,2 \text{ kg/m}^3$ (20°C – Fox [35]), $\sigma = 72,8 \times 10^{-3} \text{ N/m}$:

$$We = 2,17 \sqrt{\frac{998,2 \cdot 0,05}{72,8 \cdot 10^{-3}}} \Rightarrow We = 56,8 > We_c = \sqrt{57} = 7,55$$

Portanto, neste caso, haverá a formação de jato (jato de Worthington).

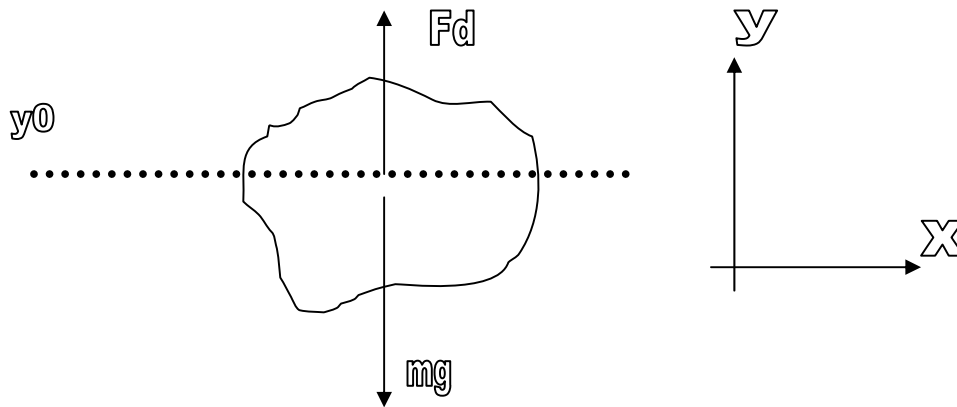


Figura 22: Forças atuantes em um corpo em queda

Por outro lado, pode-se aprimorar o cálculo, igualando-se a força de arrasto à força peso encontra-se a velocidade terminal, ou seja,

$$F_d = \frac{C_d \rho_{ar} V^2 A_{projetada}}{2} \Leftrightarrow V_t = \sqrt{\frac{2F_d}{C_d \rho_{ar} A_{projetada}}} \quad \dots \text{(Equação 4)}$$

Estimando-se o valor do comprimento como sendo 5 vezes o valor do diâmetro do objeto de queda e a massa específica do objeto = $0,9 \text{ kg / m}^3$, pode-se calcular a massa do objeto de queda como sendo a multiplicação da massa específica e o volume:

$$m = (Vol)(\rho) = (\pi d^2 5d) 0,9 = 4,5\pi d^3 = 4,5\pi(0,05)^3$$

$$\Rightarrow m = 0,0018 \text{ kg}$$

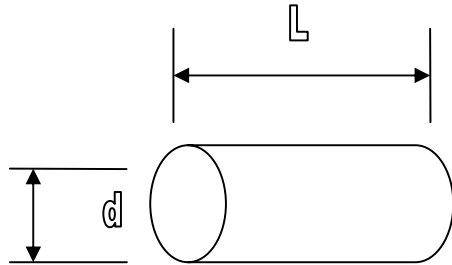


Figura 23: Estimativa entre as dimensões do objeto de queda

Utilizando-se a mesma proporção de 5 vezes entre o comprimento e o diâmetro, pode-se obter o valor do coeficiente de forma, conforme a Figura 23:

$$L/d = 5 \Rightarrow C_d = 0,8 \text{ (Fox)}$$

Também obtendo-se a área projetada do objeto como sendo a multiplicação do diâmetro pelo comprimento, ou seja:

$$A_{\text{projetada}} = d \cdot L = 5d^2 = 5(0,05)^2 \Rightarrow A_{\text{projetada}} = 0,0125 \text{ m}^2$$

Obtendo-se a força peso exercida pelo objeto pela multiplicação da massa pela gravidade local e igualando-se à Força de arraste, conforme Figura 22:

$$F_d = mg = (0,0018) \cdot (9,81) \Rightarrow F_d = 0,017 \text{ N}$$

Utilizando-se os dados obtidos anteriormente e a massa específica do ar através de Fox [35], pode-se estimar a velocidade terminal através da Equação 4, portanto:

$$\rho_{\text{ar}} = 1,166 \text{ kg/m}^3 \text{ (20°C – Fox [35])}$$

$$V_t = \sqrt{\frac{2(0,017)}{(0,8)(1,166)(0,0125)}} \Rightarrow V_t = 1,72 \text{ m/s}$$

Verificando-se a faixa de validade de valores do número de Reynolds para o coeficiente de forma adotado:

$$\text{Re} = \frac{V_t L}{\nu} = \frac{1,72(5,0,05)}{(0,156 \cdot 10^{-4})} \Rightarrow \text{Re}_y = 27.564$$

Sendo válida a hipótese pois:

$$10^3 < \text{Re} < 10^5$$

Também pode-se calcular a velocidade de queda, segundo Fox [35], utilizando-se a aceleração como sendo a variação da velocidade com o tempo, ou seja,

$$\sum F_y = ma_y = m \frac{dV}{dt} \quad \dots \text{(Equação 5)}$$

Utilizando-se a velocidade de queda em função do tempo:

$$V = V(t) \quad \dots \text{(Equação 6)}$$

Pode-se obter a derivada da velocidade em função da distância de queda, fazendo-se:

$$\sum F_y = m \frac{dV}{dy} \frac{dy}{dt} = mV \frac{dV}{dy} \quad \dots \text{(Equação 7)}$$

Substituindo-se a soma das forças na direção “y” pelas forças atuantes:

$$\sum F_y = F_D - mg = mV \frac{dV}{dy} \quad \dots \text{(Equação 8)}$$

Podendo-se expressar a força de araste do fluido no objeto (F_D) por:

$$F_D = \frac{C_d \rho_{ar} V^2 A_{projetada}}{2} \Leftrightarrow F_D = kV^2 \quad \dots \text{(Equação 9)}$$

Pode-se reunir os valores que independem da velocidade por uma fator “k” da seguinte forma:

$$k = \frac{C_d \rho_{ar} A_{projetada}}{2} \quad \dots \text{(Equação 10)}$$

Isolando-se os termos que dependem da distância de queda, em termos diferenciais, no lado esquerdo e os demais termos do lado direito da equação, pode-se integrar ambos os termos, ou seja:

$$\int_{y_0}^y dy = \int_0^v \frac{mVdV}{kv^2 - mg} \quad \dots \text{(Equação 11)}$$

Após a integração, obtém-se:

$$y - y_0 = \left[\frac{m}{2k} \ln(kv^2 - mg) \right]_0^v \quad \dots \text{(Equação 12)}$$

Integrando-se no intervalo de “0” a “V”, obtém-se:

$$y - y_0 = \frac{m}{2k} \ln \left(\frac{kv^2 - mg}{-mg} \right) \quad \dots \text{(Equação 13)}$$

Pode-se re-arranjar os termos de forma a isolar V:

$$kv^2 - mg = e^{\left[\frac{2k}{m}(y-y_0) \right]} (-mg) \quad \dots \text{(Equação 14)}$$

Após as operações algébricas necessárias, obtém-se a função da velocidade com a distância de queda:

$$V = \left[\frac{mg}{k} \left(1 - e^{\left[\frac{2k}{m}(y-y_0) \right]} \right) \right] \quad \dots \text{(Equação 15)}$$

Chamando-se de “A” o expoente do número neperiano e substituindo-se o fator “k” pela equação 10, tem-se:

$$A = \left[\frac{2k}{m}(y - y_0) \right] = \frac{2(C_d \rho_{ar} A_{projetada})}{2m} (y - y_0) \quad \dots \text{(Equação 16)}$$

Substituindo-se os valores já obtidos anteriormente, ou seja:

$$\begin{aligned} C_D &= 0,8 \\ \rho_{ar} &= 1,166 \text{ kg/m}^3; \\ A_{proj} &= 0,0125 \text{ m}^2; \\ y - y_0 &= -0,38 + 0,14 = -0,24 \text{ m}; \\ m &= 0,0018 \text{ kg}. \end{aligned}$$

Obtém-se o valor de “A” através da equação 16:

$$A = \frac{2(0,8 \cdot 1,166 \cdot 0,0125)}{2 \cdot 0,0018} (-0,24) \Rightarrow A = -1,55$$

E, conseqüentemente, o valor da velocidade máxima levando-se em consideração a resistência do ar:

$$V = \left[\frac{0,0018 \cdot 9,81}{(0,8 \cdot 1,166 \cdot 0,0125)} (1 - e^{-1,55}) \right] \Rightarrow V = 1,19 \text{ m/s}$$

A partir do valor da velocidade máxima, pode-se compará-lo com o valor da velocidade obtido anteriormente:

$$\frac{V}{V_t} = \frac{1,19}{1,72} = 69,5\%$$

Ou seja, a velocidade máxima analisando-se a resistência do ar é de, aproximadamente, 70% se não considerarmos esta resistência.

Calculando-se o Número de Weber através da equação 2, pode-se compará-lo com o número de Weber crítico, ou seja,

$$We = 1,19 \sqrt{\frac{(998,2)(0,05)}{72,8 \cdot 10^{-3}}} \Rightarrow We = 31,2 > We_c = \sqrt{57}$$

Resultado próximo ao obtido anteriormente, havendo, também, a formação de jato (jato de Worthington).

Pode-se estimar a distância entre a borda do vaso sanitário e a superfície do líquido do poço, denominado "h" a profundidade do poço, para que o usuário não seja atingido pelo jato, da seguinte forma:

$$We_c = \sqrt{57} = \left[\frac{mg}{k} \left(1 - e^{\left[\frac{2k}{m}(y-y_0) \right]} \right) \right] \sqrt{\frac{\rho D}{\sigma}} \quad \dots \text{(Equação 17)}$$

Substituindo os valores utilizados anteriormente, obtém-se h:

$$We_c = \sqrt{57} = \left[\frac{(0,001)(998)}{0,0059} \left(1 - e^{\left[\frac{20,0059}{0,0018}(h-0,38) \right]} \right) \right] \sqrt{\frac{(998)(0,05)}{728 \cdot 10^3}}$$

Elevando-se ambos os lados da equação ao quadrado e resolvendo os termos em parênteses, tem-se:

$$57 = 6.140,9 \left(1 - e^{[6,55(h-0,38)]} \right)$$

Isolando-se o novo termo em parênteses, tem-se:

$$0,009 = \left(1 - e^{[6,55(h-0,38)]} \right)$$

Isolando-se o termo do número neperiano:

$$0,991 = \left(e^{[6,55(h-0,38)]} \right)$$

Aplicando-se o logaritmo neperiano em ambos os lados da equação, pode-se obter o valor da altura procurada, ou seja,

$$\ln(0,991) = 6,55(h - 0,38) \Rightarrow h = 0,379 m$$

Também pode-se estimar a altura do jato através da conservação da energias envolvidas, ou seja,:

Energia para formação do jato Worthington = E% energia queda do objeto,

Ou seja, a energia que resultou após a queda do objeto necessária para formar o jato pode ser expressa matematicamente por:

$$E(\%)m_f gh = m_j gh' \quad \dots \text{(Equação 18)}$$

Sendo:

m_f = massa do objeto [kg];

m_j = massa do jato Worthington [kg];

$E\%$ = 45% (para pequenas profundidades, apud Alkschbirs [20]), ou seja, 45% da energia de queda do objeto é utilizada para formação do jato, portanto 55% é gasto na queda do objeto.

Isolando-se a altura do jato e expressando-se em termos de densidades do objeto e do líquido alvo (neste caso a água), tem-se:

$$h' = \frac{m_f E\% h}{m_g} = \frac{d_f V_f h E\%}{d_a V_g} \quad \dots \text{(Equação 19)}$$

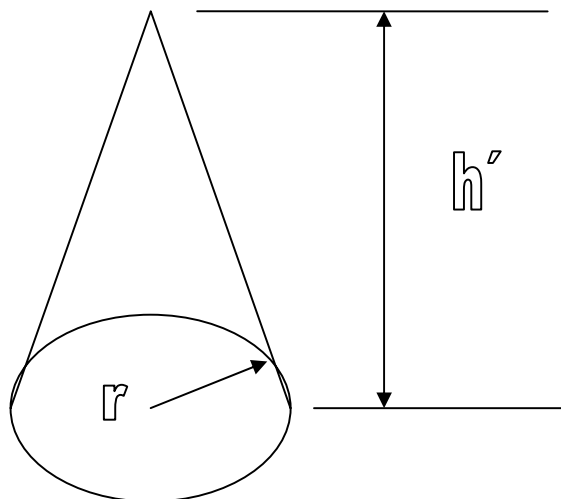


Figura 24: Croqui para auxílio da estimativa do jato de Worthington

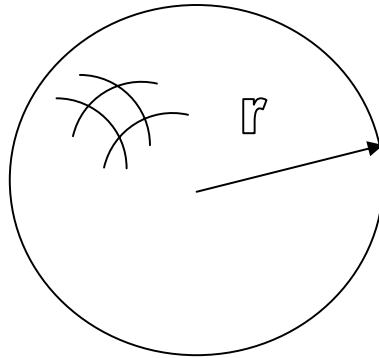


Figura 25: Raio “r” da esfera correspondente

Utilizando-se a Figura 24, pode-se estimar o volume por:

$$V_j = \frac{1}{3} \pi r^2 h' \quad \dots \text{(Equação 20)}$$

Expressando-se a altura do jato através de uma esfera que contenha o mesmo volume, conforme Figura 25, tem-se:

$$V_f = \frac{4}{3} \pi r^3 \quad \dots \text{(Equação 21)}$$

Igualando-se os volumes e isolando-se a altura do jato, obtém-se:

$$h' = \frac{d_f \left(\frac{4}{3} \pi r^3 \right) h E \%}{d_a \left(\frac{1}{3} \pi r^2 h' \right)} \Rightarrow h' = \sqrt{\frac{4 r E \% h d_f}{d_a}} \quad \dots \text{(Equação 22)}$$

Estimando-se a densidade do objeto como sendo 90% da densidade da água, ou seja, $d_f = 0,9 d_a$, tem-se:

$$h' = \sqrt{\frac{4 \left(\frac{0,025}{2} \right) 0,45 (0,38 - 0,14) 0,9}{1}} \Rightarrow h' = 0,07 \text{m} (= 7,0 \text{cm})$$

Portanto, haverá a formação do jato de Worthington, mas não atingirá o usuário do aparelho sanitário.

Também pode-se aprimorar o cálculo, partindo-se da similaridade geométrica entre a queda de uma gota d'água de um conta-gota, conforme deduções de Vieira [71]:

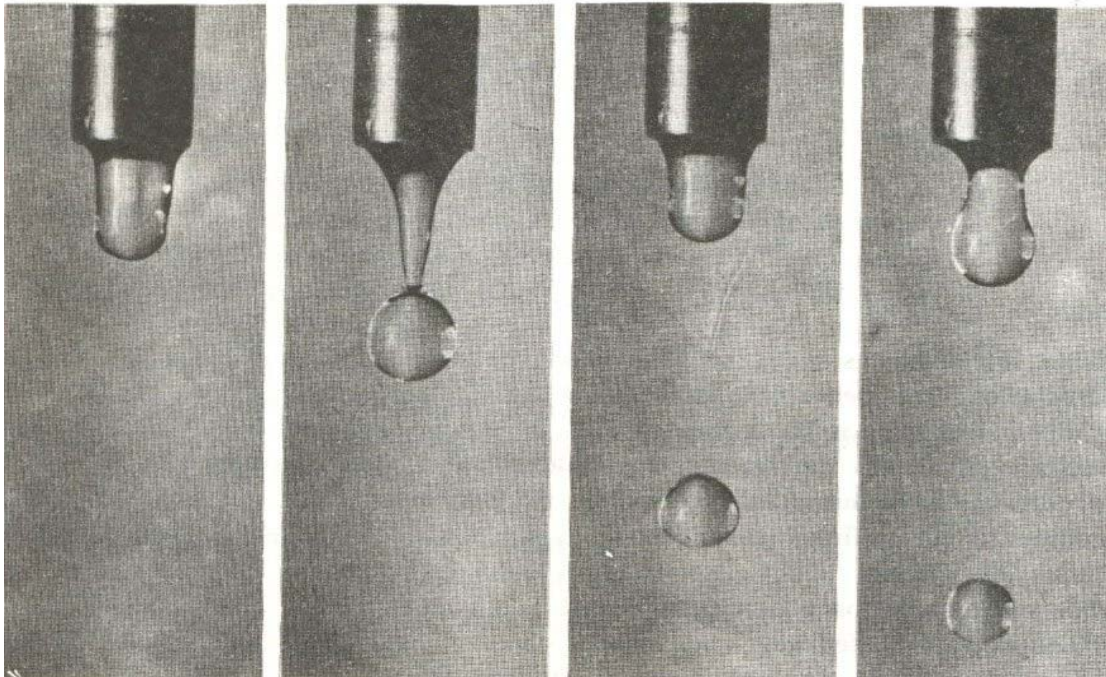


Figura 26: Formação e queda de uma gota d'água (Azevedo Neto [54])

Pode-se chamar a força devida à tensão superficial do líquido ao longo de uma superfície esférica por:

$$F_{\sigma} = \pi d \sigma \quad \dots \text{(Equação 23)}$$

Sendo:

F_{σ} = força devida à tensão superficial [N];

d = diâmetro na água correspondente ao diâmetro característico do objeto de queda [m];

σ = tensão superficial da água [N/m].

Expressando-se o peso da gota formada em função do volume desta gota, tem-se:

$$P = mg = \rho Vg \quad \dots \text{(Equação 24)}$$

Sendo o volume da esfera formada expressa pelo raio da esfera:

$$V = \frac{4}{3}\pi r^3 \quad \dots \text{(Equação 25)}$$

Fazendo-se o equilíbrio de forças entre o peso e a força devida à tensão superficial, tem-se:

$$F_\sigma = P \Leftrightarrow \pi d\sigma = \rho Vg = \rho \frac{4}{3}\pi r^3 g \quad \dots \text{(Equação 26)}$$

Na equação acima, pode-se isolar o raio da esfera, obtendo-se:

$$r = \sqrt[3]{\frac{3d\sigma}{4\rho g}} \quad \dots \text{(Equação 27)}$$

Substituindo-se os valores já determinados anteriormente, tem-se:

$$r = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot (0,05) \cdot (72,8 \cdot 10^{-3})}{(4.998,2) \cdot (9,81)}} \Rightarrow r = 0,0065m$$

Desprezando-se as perdas de energia de formação da gota, pode-se estimar a altura de uma gota de raio “ r ” com Energia inicial, estimando-se em 45% (para pequenas profundidades, apud Alkschbirs [20]) a energia residual, tem-se:

$$45\%mgh = m_G gh' \Leftrightarrow 45\%mgh = \rho g \frac{4}{3} \pi r^3 h' \quad \dots \text{ (Equação 28)}$$

Isolando-se na equação anterior o valor da altura procurada, tem-se:

$$h' = \frac{45\%mgh}{\rho g \frac{4}{3} \pi r^3} \quad \dots \text{ (Equação 29)}$$

Substituindo-se os valores já obtidos anteriormente, tem-se:

$$h' = \frac{(45\%)(0,0018)(9,81)(0,24)}{(998,2)(9,81) \cdot \frac{4}{3} \pi 0,0065^3} \Rightarrow h' = 0,17m < 0,24m(O.K.)$$

Também não havendo respingos para o usuário.

2.2 Bacias sanitárias de ação sifônica

As bacias sanitárias de ação sifônica têm um funcionamento explicado por Rocha [61], de forma bem detalhada, transcrita na Figura 27:

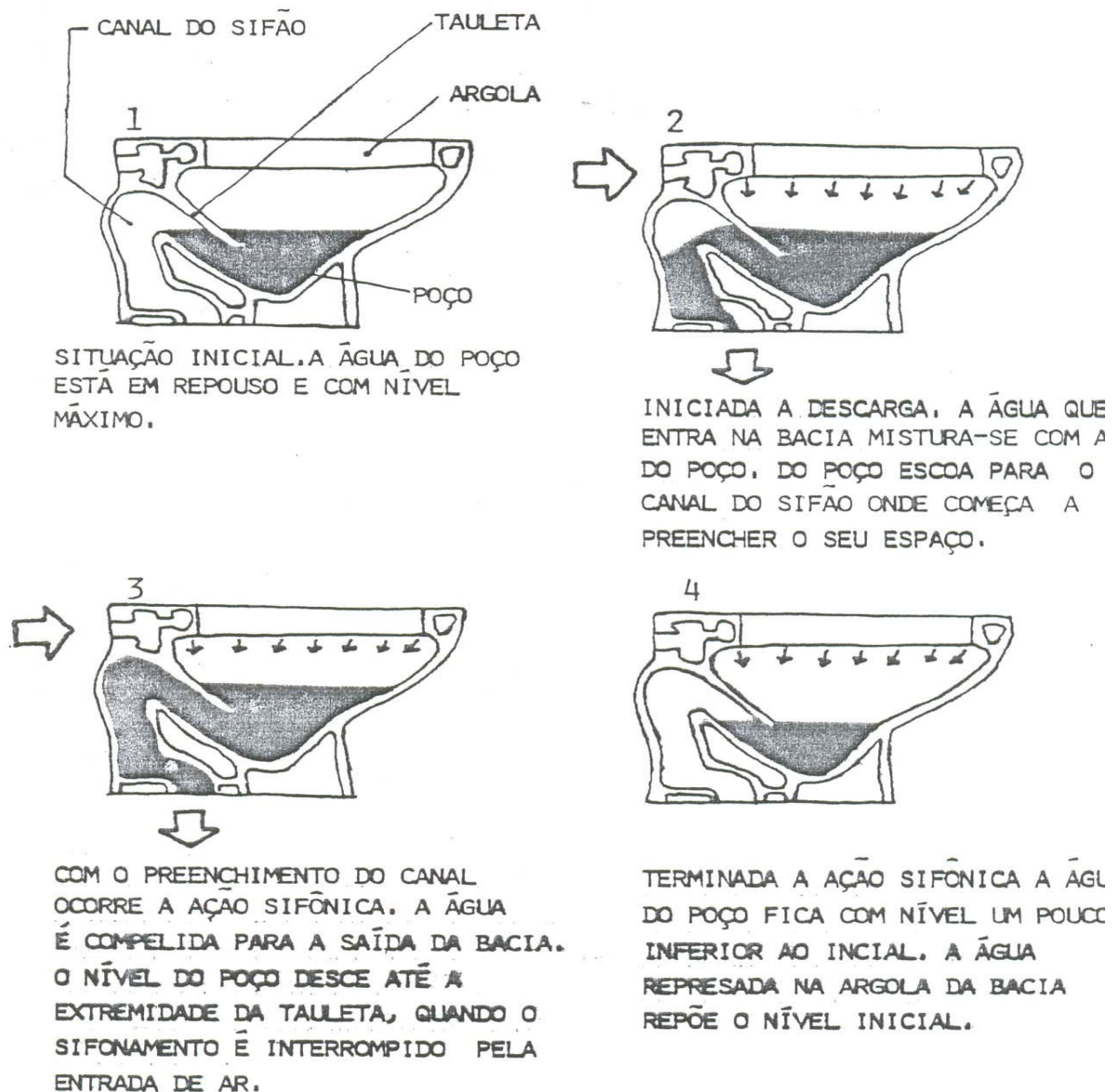


Figura 27: Bacia sanitária de ação sifônica (fonte: [61])

2.2.1 Uso das equações de Abramovich

Para o equacionamento, foram adotados os croquis de Mendes [50] e o sistema de “cyclone” da empresa TotoUSA [12], conforme Figura 28, abaixo.



Figura 28: Sistema de jato periférico da empresa TotoUSA [12] (modelo Neorest 600)

Interessante notar que o modelo de jato periférico foi citado em Landi [47], quando da História da Hidráulica, em duas ocasiões, descritas nas Figura 29 e Figura 30 a seguir.

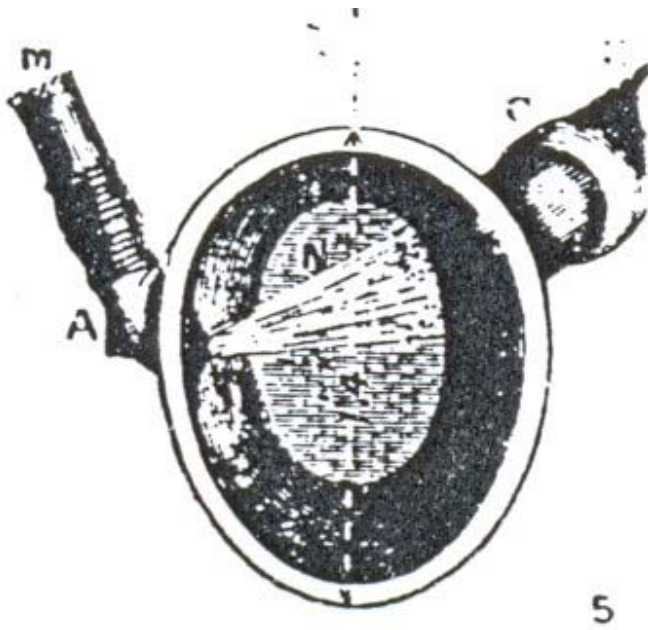


Figura 29: Descarga com jato periférico (apud Landi [47])



Figura 30: Descarga com vórtice (apud Landi [47])



Figura 31: Formação de redemoinho (foto tirada na Estação Ciência – São Paulo [1] na seção Furacões, em 11/01/08)

1) Aplicando-se a Equação de Bernoulli entre os pontos 1 e 2, tem-se:

$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} \Leftrightarrow \frac{p_1 - p_2}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{v^2}{2g} = h \quad \dots \text{(Equação 30)}$$

Portanto, a carga hidráulica pode ser expressa por:

$$h = \frac{v_r^2 + u^2}{2g} \quad \dots \text{(Equação 31)}$$

Onde:

V_r = velocidade radial à tubulação

u = velocidade tangencial à tubulação

2) Também pode-se expressar o valor constante do momento da quantidade de movimento por:

$$Q\rho Rv_1 = Q\rho r_{rem} \quad \dots \text{(Equação 32)}$$

Sendo este fenômeno demonstrado pela Figura 31.

Sendo r_{rem} = raio do redemoinho aéreo em 2-2, pode-se obter as velocidades em funções dos raios já definidos:

$$u = v_1 \frac{R}{r_{rem}} \quad \dots \text{(Equação 33)}$$

3) Utilizando-se a Equação da continuidade pois tem-se fluxo constante, tem-se:

$$v_1 S_1 = \varepsilon S_o v \quad \dots \text{(Equação 34)}$$

Sendo ε = coeficiente de contração do injetor, pode-se expressá-lo em função dos raios, ou seja:

$$\varepsilon = \frac{S_o - S_{rem}}{S_o} = 1 - \frac{r_{rem}^2}{r_o^2} \quad \dots \text{(Equação 35)}$$

Re-escrevendo a equação anterior e isolando-se o raio do redemoinho, tem-se:

$$r_{rem} = r_o \sqrt{1 - \varepsilon} \quad \dots \text{(Equação 36)}$$

Substituindo a expressão do raio do redemoinho na Equação 33, tem-se:

$$u = v_1 \frac{R}{r_o \sqrt{1 - \varepsilon}} \quad \dots \text{(Equação 37)}$$

Substituindo-se o valor da velocidade na seção 1, ou seja, “ v_1 ”, na equação anterior, obtém-se:

$$u = \frac{\varepsilon S_o v R}{S_1 r_o \sqrt{1 - \varepsilon}} = A \frac{\varepsilon v}{\sqrt{1 - \varepsilon}} \quad \dots \text{(Equação 38)}$$

Denominando-se $A = \frac{S_o R}{S_1 r_o}$ como sendo o parâmetro de forma do injetor, pode-se voltar à equação 31:

$$h = \frac{v_r^2 + u^2}{2g}$$

E partir da equação anterior, obter a carga hidráulica a partir dos valores dos coeficientes definidos nesta seção:

$$h = \frac{v_r^2}{2g} \left(1 + \frac{\left(\frac{A^2 \varepsilon^2}{1 - \varepsilon} \right) v_r^2}{v_r^2} \right) = \frac{v_r^2}{2g} \left(1 + \frac{A^2 \varepsilon^2}{1 - \varepsilon} \right) \quad \dots \text{(Equação 39)}$$

Isolando-se v_r na equação anterior, obtém-se:

$$v_r = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{A^2 \varepsilon^2}{1 - \varepsilon}}} \sqrt{2gh} \quad \dots \text{(Equação 40)}$$

Expressando-se a vazão Q em função do coeficiente de vazão ε tem-se:

$$Q = \varepsilon S_0 v_r = \frac{\varepsilon}{\sqrt{1 + A^2 \frac{\varepsilon^2}{1 - \varepsilon}}} S_0 \sqrt{2gh} \quad \dots \text{(Equação 41)}$$

Chamando-se μ = coeficiente de vazão, pode-se obter uma expressão com os coeficientes anteriormente definidos:

$$\mu = \frac{\varepsilon}{\sqrt{1 + A^2 \frac{\varepsilon^2}{1 - \varepsilon}}} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{\varepsilon^2} \right) + \left(\frac{A^2}{1 - \varepsilon} \right)}} \quad \dots \text{(Equação 42)}$$

Segundo G. Abramovich, apud Nekrasov [53]: “o vórtice é estável quando suas dimensões asseguram a vazão máxima com determinada carga”, ou seja, a vazão é máxima quando a pressão é mínima (resultados confirmados experimentalmente). No caso em questão, pesquisa-se o valor máximo de ε na equação de μ :

$$\frac{d\mu}{d\varepsilon} = \frac{d}{d\varepsilon} \left(\frac{1}{\sqrt{\frac{1}{\varepsilon^2} + \frac{A^2}{1-\varepsilon}}} \right) = \frac{(0,5) \left(\frac{-2}{\varepsilon^2} + \frac{A^2}{(1-\varepsilon)^2} \right)}{\left(\frac{1}{\varepsilon^2} + \frac{A^2}{1-\varepsilon} \right)^{3/2}} = 0 \quad \dots \text{(Equação 43)}$$

Após a álgebra necessária na derivação em relação ao coeficiente de contração do injetor, obtém-se:

$$\left(\frac{-2}{\varepsilon^2} + \frac{A^2}{(1-\varepsilon)^2} \right) = 0 \quad \dots \text{(Equação 44)}$$

Isolando-se o parâmetro de forma "A", tem-se:

$$A = \sqrt{\frac{2}{\varepsilon^3}} (1-\varepsilon) \quad \dots \text{(Equação 45)}$$

Por outro lado, também pode-se isolar o coeficiente de contração do injetor ε :

$$-\frac{2}{\varepsilon^3} + \frac{A^2}{(1-\varepsilon)^2} = 0 \quad \dots \text{(Equação 46)}$$

Na expressão acima, eliminando-se as frações, tem-se:

$$2(1-\varepsilon)^2 = \varepsilon^3 A^2 \quad \dots \text{(Equação 47)}$$

Desenvolvendo-se o termo entre parênteses, tem-se:

$$2(1-2\varepsilon+\varepsilon^2) = \varepsilon^3 A^2 \quad \dots \text{(Equação 48)}$$

Aplicando-se a propriedade multiplicativa, tem-se:

$$\varepsilon^3 A^2 - 2\varepsilon^2 + 4\varepsilon - 2 = 0 \quad \dots \text{(Equação 49)}$$

A equação de 3º grau acima pode ser resolvida utilizando-se o Método de Tartaglia, definindo-se os coeficientes a,b,c,d conforme a equação abaixo:

$$a\varepsilon^3 + b\varepsilon^2 + c\varepsilon + d = 0 \quad \dots \text{(Equação 50)}$$

Dividindo-se todos os membros pelo fator “a” que, neste caso corresponde a “A²” (comparando-se com a equação 49) e, portanto, diferente de zero, tem-se:

$$\varepsilon^3 + \left(\frac{b}{a}\right)\varepsilon^2 + \left(\frac{c}{a}\right)\varepsilon + \left(\frac{d}{a}\right) = 0 \quad \dots \text{(Equação 51)}$$

A partir da equação anterior, pode-se definir novos coeficientes, ou seja:

$$\varepsilon^3 + E\varepsilon^2 + F\varepsilon + G = 0 \quad \dots \text{(Equação 52)}$$

Através da equação anterior para o estudo em questão e calculando-se o parâmetro de forma do injetor na equação 45, utilizando-se os valores já conhecidos do modelo, tem-se:

$$S_1 = \frac{\pi 0,04^2}{4} \quad [\text{m}^2]$$

$$r_0 = 0,1 \quad [\text{m}]$$

$$S_0 = \frac{\pi 0,1^2}{4} \quad [\text{m}^2]$$

$$R = \frac{0,158}{2} \quad [\text{m}]$$

$$A = \frac{S_0 R}{S_1 r_0} = \frac{\left(\frac{\pi 0,1^2}{4}\right)\left(\frac{0,158}{2}\right)}{\left(\frac{\pi 0,04^2}{4}\right)(0,1)} = 4,94$$

Substituindo-se os valores obtidos através dos valores acima, os coeficientes “E”, “F” e “G” da equação 51 da seguinte forma:

$$E = \frac{b}{a} = \frac{-2}{A^2} = \frac{-2}{(4,94)^2} = -0,082$$

$$F = \frac{c}{a} = \frac{4}{A^2} = \frac{4}{(4,94)^2} = 0,164$$

$$G = \frac{d}{a} = \frac{-2}{A^2} = \frac{-2}{(4,94)^2} = -0,082$$

Substituindo-se os valores obtidos acima, na equação 52, tem-se:

$$\varepsilon^3 + -0,082\varepsilon^2 + 0,164\varepsilon - 0,082 = 0 \quad \dots \text{(Equação 53)}$$

Na solução da equação do 3º grau acima, pode-se aplicar a mudança de variável de Tartaglia:

$$\varepsilon = y - \frac{E}{3} = y + 0,027 \quad \dots \text{(Equação 54)}$$

Após a transformação anterior, obtém-se uma equação em função da variável “y”, sem o termo de segundo grau:

$$y^3 + \left(F - \frac{E^2}{3} \right) y + \left(G - \frac{EF}{3} + 2\frac{E^3}{27} \right) = 0 \quad \dots \text{(Equação 55)}$$

Substituindo-se os valores já determinados de “E”, “F” e “G” na equação acima, tem-se:

$$y^3 + \left(0,164 - \frac{(-0,082)^2}{3} \right) y + \left(-0,082 - \frac{(-0,082)(0,164)}{3} + 2\frac{(-0,082)^3}{27} \right) = 0 \quad \dots \text{(Equação 56)}$$

Realizando-se as álgebras necessárias entre parênteses, tem-se:

$$y^3 + 0,162y - 0,078 = 0 \quad \dots \text{(Equação 57)}$$

A partir das transformações acima, pode-se utilizar a solução de Cardano:

$$y^3 + py + q = 0 \quad \dots \text{(Equação 58)}$$

Sendo os coeficientes da variável “y” definidos por:

$$p = 0,162$$

$$q = -0,078$$

Calculando-se apenas a parte real da equação acima por:

$$y_1 = H + I \quad \dots \text{(Equação 59)}$$

Sendo o termo “H” definido por:

$$H = \sqrt[3]{\left\{ \frac{-q}{2} + \sqrt{\left[\left(\frac{p}{3} \right)^3 + \left(\frac{q}{2} \right)^2 \right]} \right\}} \quad \dots \text{(Equação 60)}$$

Substituindo os valores de “p” e “q” já definidos anteriormente, tem-se:

$$H = \sqrt[3]{\left\{ \frac{-(-0,078)}{2} + \sqrt{\left[\left(\frac{0,162}{3} \right)^3 + \left(\frac{-0,078}{2} \right)^2 \right]} \right\}}$$

Obtém-se o valor do termo “H” após as álgebras necessárias na equação anterior, ou seja:

$$H = 0,431$$

Da mesma forma procede-se para o termo “I”, definindo-se através da equação abaixo:

$$I = \sqrt[3]{\left\{ \frac{-q}{2} - \sqrt{\left[\left(\frac{p}{3} \right)^3 + \left(\frac{q}{2} \right)^2 \right]} \right\}} \quad \dots \text{(Equação 61)}$$

Substituindo os valores de “p” e “q” já definidos anteriormente, tem-se:

$$I = \sqrt[3]{\left\{ \frac{-(-0,078)}{2} - \sqrt{\left[\left(\frac{0,162}{3} \right)^3 + \left(\frac{-0,078}{2} \right)^2 \right]} \right\}}$$

Obtém-se o valor do termo “I” após as álgebras necessárias na equação anterior, ou seja:

$$I = -0,125$$

Substituindo-se os valores obtidos de “H” e “I” na equação 59, obtém-se o valor da parte real “y₁”, ou seja:

$$y_1 = 0,431 - 0,125 \Rightarrow y_1 = 0,306$$

Voltando-se na equação 54, obtém-se o valor do coeficiente de contração do injetor no modelo estudado, ou seja,

$$\varepsilon = y - \frac{E}{3} = y + 0,027 = 0,306 + 0,027 \Rightarrow \varepsilon = 0,333$$

Outro parâmetro importante é o ângulo de saída α que será deduzido a partir do triângulo de velocidades de saída, utilizando-se a Figura 34 a seguir:

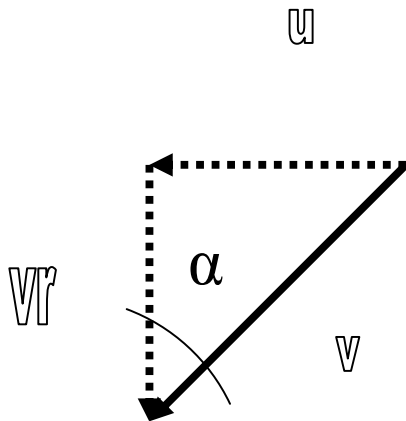


Figura 34: Triângulo de velocidades na saída da bacia sanitária.

Definindo-se “ α ” como o ângulo formado pelos vetores v_r e v na figura anterior, e expressando-se através dos valores já definidos neste trabalho, tem-se:

$$tg\alpha = \frac{u}{v_r} = \frac{A\varepsilon}{\sqrt{(1-\varepsilon)}} \frac{v_r}{v_r} \quad \dots \text{(Equação 62)}$$

Cancelando-se o valor de “ v_r ” na equação acima, tem-se:

$$tg\alpha = \frac{u}{v_r} = \frac{A\varepsilon}{\sqrt{(1-\varepsilon)}} \quad \dots \text{(Equação 63)}$$

A partir da equação acima, pode-se obter o valor do ângulo “ α ” da seguinte forma:

$$\alpha = arctg\left(\frac{A\varepsilon}{\sqrt{(1-\varepsilon)}}\right) \quad \dots \text{(Equação 64)}$$

Substituindo os valores já obtidos neste trabalho na equação anterior, obtém-se o valor procurado do ângulo “ α ”, ou seja:

$$\alpha = \arctg\left(\frac{(4,94)(0,333)}{\sqrt{(1-0,333)}}\right) \Rightarrow \alpha \cong 63,6^\circ$$

Também pode-se obter a velocidade radial ao escoamento através da equação 40, ou seja:

$$v_r = \frac{\sqrt{2gh}}{\sqrt{1 + A^2 \frac{\varepsilon^2}{1-\varepsilon}}} \Rightarrow v_r = 1,04 \text{ m/s}$$

A partir do valor da velocidade radial e do ângulo “ α ”, ambos obtidos anteriormente, estima-se o valor da velocidade ao longo do escoamento, ou seja:

$$v = \frac{v_r}{\cos(\alpha)} \Rightarrow v = 2,33 \text{ m/s}$$

Com os valores obtidos, pode-se retomar a Equação 39 para obter o valor da carga hidráulica para assegurar a estabilidade do vórtice:

$$h = \frac{v_r^2}{2g} \left(1 + \frac{A^2 \varepsilon^2}{1-\varepsilon}\right) = \frac{1,04^2}{2 \cdot 9,81} \left[1 + \frac{(4,94 \cdot 0,333)^2}{(1-0,333)}\right] \Rightarrow h = 0,279 \text{ m}$$

Percebe-se pelo valor acima que pode ser obtido por uma caixa de descarga comercial baixa ou acoplada.

Retomando-se a Equação 42 para a determinação do coeficiente de vazão “ μ ”, substituindo-se os valores já determinados do parâmetro de forma “A” e do coeficiente de vazão “ ε ”, tem-se:

$$\mu = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{0,333^2}\right) + \left(\frac{4,94^2}{1-\varepsilon}\right) 0,333}} \Rightarrow \mu = 0,149$$

Outra forma é através do gráfico ε, μ versus A (expressos pela figura 35, a seguir), obtido dos equacionamentos anteriores, sendo que os valores serão utilizados posteriormente neste trabalho.

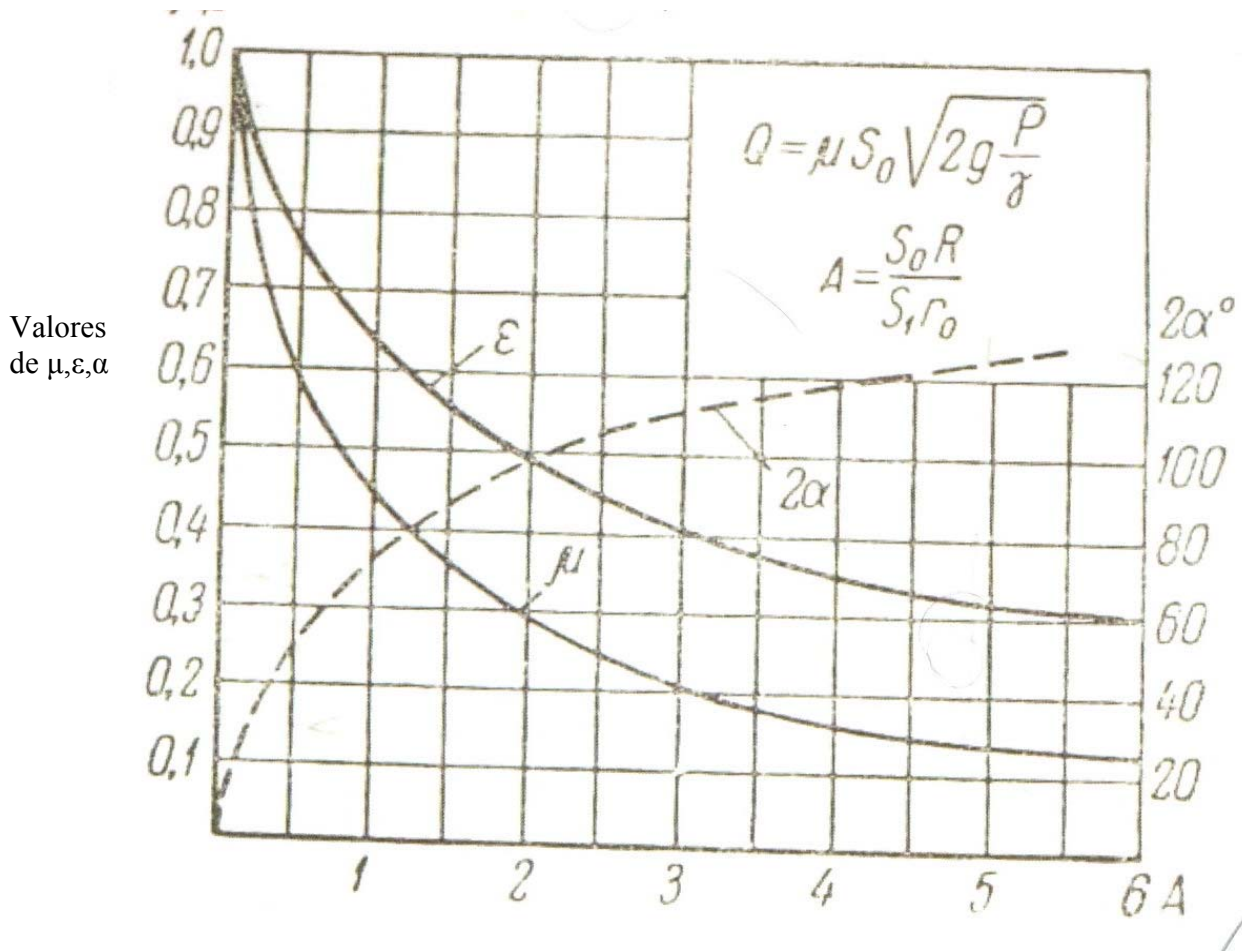


Figura 35: Gráfico ϵ, μ, α versus A (Equações de Abramovich [53])

2.2.2 Volume do tronco-cônico

Um valor interessante para o estudo em questão é do volume correspondente ao fecho hídrico da bacia sanitária, podendo ser estimado, para o caso em questão, da seguinte figura abaixo:

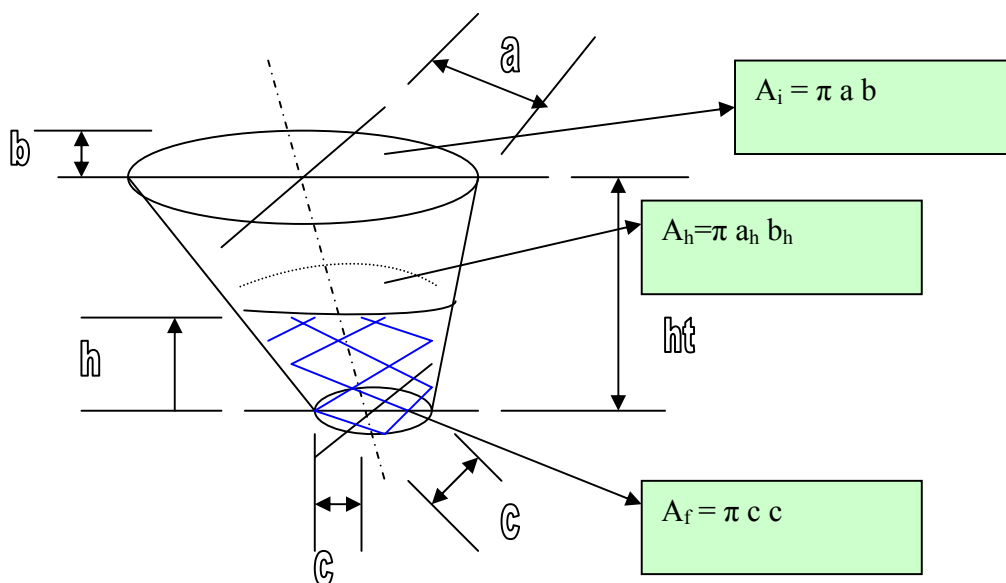


Figura 36: Croqui para cálculo do volume de água do fecho hídrico.

De acordo com o desenho acima, a área da superfície líquida “ A_h ” pode ser expressa por:

$$A_h = \pi a_h b_h = \pi \left\{ \left[\frac{h}{h_t} (a - c) \right] + c \right\} \left\{ \left[\frac{h}{h_t} (b - c) \right] + c \right\} \quad \dots \text{(Equação 65)}$$

Utilizando-se os valores obtidos na **Figura 21** (Mendes [50]), tem-se:

$$h_t = 0,38 - (0,07 + 0,035) \Rightarrow h_t = 0,275\text{m}$$

$$h = 0,035\text{m}$$

$$a = 0,315 + 0,05 + 0,05 \Rightarrow a = 0,415\text{m}$$

$$c = 0,07\text{m}$$

$$b = 0,158\text{m}$$

Substituindo-se estes valores na equação 65, tem-se:

$$A_h = \pi a_h b_h = \pi \left\{ \left[\frac{0,035}{0,275} (0,415 - 0,07) \right] + 0,07 \right\} \left\{ \left[\frac{0,035}{0,275} (0,158 - 0,07) \right] + 0,07 \right\}$$

$$\Rightarrow A_h = 0,029 \text{ m}^2$$

Da mesma maneira, calculando-se A_f , tem-se:

$$A_f = \pi c^2 = \pi (0,07)^2 \Rightarrow A_f = 0,004 \text{ m}^2$$

Expressando-se o volume da parte hachurada na Figura 36, obtém-se o volume do fecho hídrico, ou seja:

$$V_h = (A_f + A_h) \frac{h}{2} = (0,004 + 0,029) \frac{0,035}{2} \Rightarrow V_h = 5,78 \times 10^{-4} \text{ m}^3 (= 0,58 \text{ litros})$$

2.2.3 Cálculo da perda de carga no sifão-trompa

Retomando-se a Equação 41, tem-se:

$$Q = \varepsilon S_0 v_r = \frac{\varepsilon}{\sqrt{1 + A^2 \frac{\varepsilon^2}{1 - \varepsilon}}} S_0 \sqrt{2gh} = \mu S_0 \sqrt{2gh}$$

Com os valores já obtidos em itens anteriores deste trabalho, dos coeficientes e parâmetro de forma, ou seja:

$$\begin{aligned}
A &= 4,94 \\
\varepsilon &= 0,333 \\
\mu &= 0,149 \\
S_0 &= 0,004\text{m}^2 (=A_f) \\
H &= h_t = 0,275\text{m}
\end{aligned}$$

Obtém-se o valor da vazão de saída do tronco cone, ou seja:

$$Q = \mu S_0 \sqrt{2gH} = 0,149 \cdot 0,004 \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 0,275}$$

$$\Rightarrow Q = 1,38 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 / \text{s} (= 1,38 \text{ litros} / \text{s})$$

Calculando-se a velocidade através da Equação da Continuidade, obtém-se:

$$v = \frac{Q}{S_o} = \frac{1,38 \cdot 10^{-3}}{0,004} \Rightarrow v = 0,35 \text{ m} / \text{s}$$

E o número de Reynolds no escoamento:

$$Re = \frac{VD}{\nu} = \frac{(0,35)(0,07)}{1,01 \cdot 10^{-6}} \Rightarrow Re = 24.257$$

Em 1993, Swamee apresentou uma equação geral válida para todos os tipos de escoamentos, citada em Porto [60], dada a seguir:

$$f = \left\{ \left(\frac{64}{Re} \right)^8 + 9,5 \left[\ln \left(\frac{\varepsilon_T}{3,7d} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) - \left(\frac{2500}{Re} \right)^6 \right]^{-16} \right\}^{0,125} \quad \dots \text{ (Equação 66)}$$

Os valores da equação anterior já determinados neste trabalho são:

$$\begin{aligned}
Re &= 24.257 \\
d &= 0,07\text{m} \\
\varepsilon_T &= 0,01 \cdot 10^{-3} \text{ m (equivalente ao tubo de PVC)}
\end{aligned}$$

Substituindo os valores anteriores na equação 66, obtém-se o fator de atrito “f”, ou seja:

$$f = \left\{ \left(\frac{64}{24.257} \right)^8 + 9,5 \left[\ln \left(\frac{0,01 \cdot 10^{-3}}{3,7 \cdot 0,07} + \frac{5,74}{24.257^{0,9}} \right) - \left(\frac{2500}{24.257} \right)^6 \right]^{-16} \right\}^{0,125}$$

$$\Rightarrow f = 0,0067$$

Para o estudo das perdas de cargas na saída do sistema (sifão-trompa), utiliza-se a seguinte formulação, obtido de Fox [35], pois o escoamento se torna desenvolvido a partir de $50 D$ ($= 50 \times 3''$), ou seja, superior a $50 \times 0,075 = 3,75$ metros:

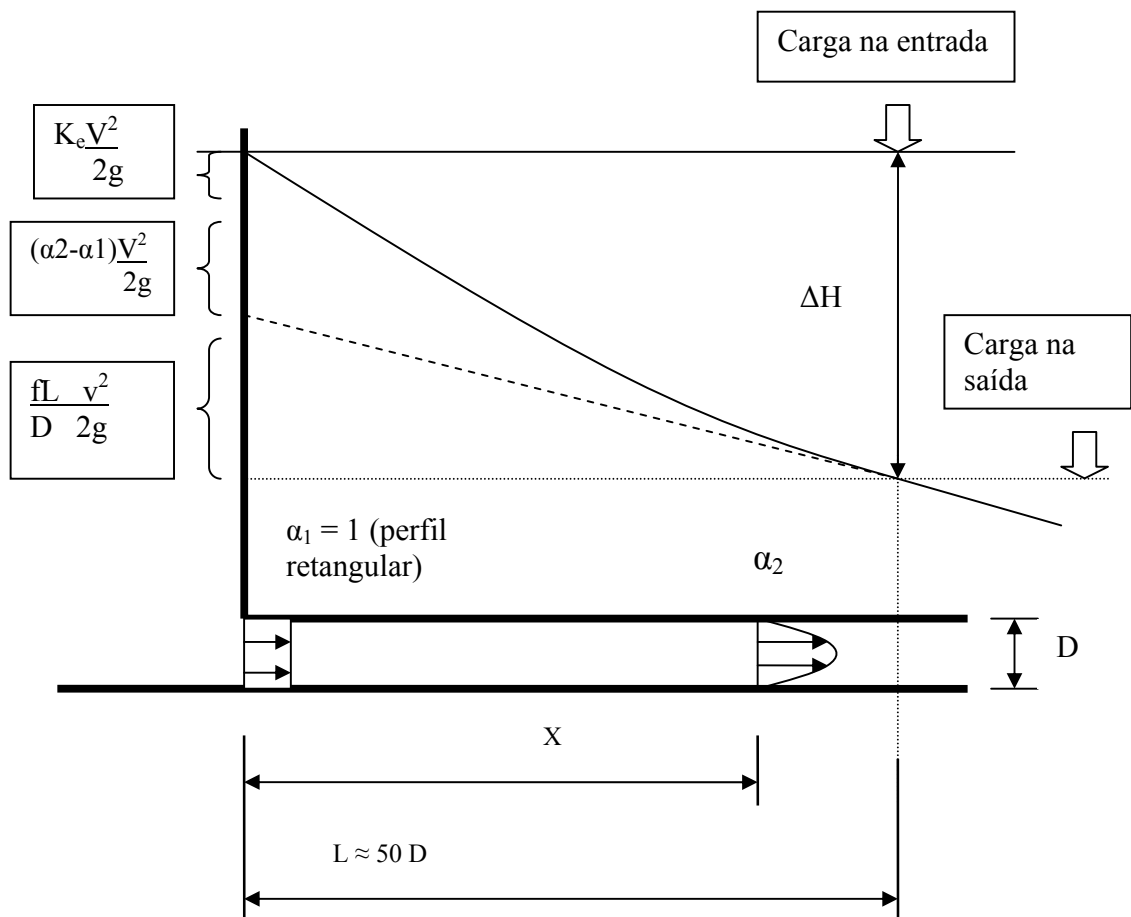
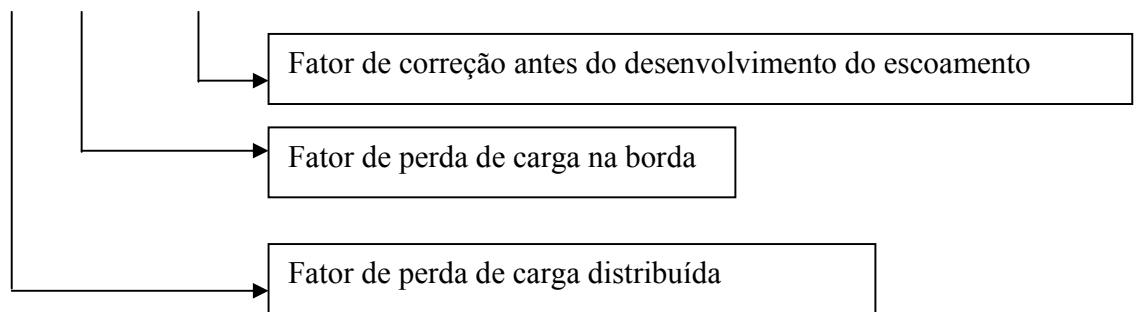


Figura 37: Definição esquemática da perda de carga distribuída em uma tubulação, antes da formação do escoamento desenvolvido.

Sendo a perda de carga no trecho expressa através da diferença correspondente antes do escoamento somada ao fator de perda de carga na borda e ao fator da perda de carga distribuída no trecho estudado, ou seja:

$$\Delta H = \left[f \frac{L}{D} + K_e + (\alpha_2 - \alpha_1) \right] \frac{v^2}{2g} \quad \dots \text{(Equação 67)}$$



Sendo o coeficiente “ α_2 ” calculado a partir dos seguintes cálculos, em função do número de Reynolds, conforme relatado em Fox [35]:

$$n = -1,7 + 1,8 \log(\text{Re}) = -1,7 + 1,8 \log(24.257) \Rightarrow n = 6,19$$

Para $\text{Re} > 2 \times 10^4 \Rightarrow \text{Ok}$

A partir do valor acima, calcula-se a razão entre a velocidade média (V) e a velocidade na linha de centro (U):

$$\frac{V}{U} = \frac{2n^2}{(n+1)(2n+1)} = \frac{2(6,19)^2}{(6,19+1)(2 \times 6,19+1)} \Rightarrow \frac{V}{U} = 0,797$$

Portanto o valor do fator de correção α_2 pode ser expresso por:

$$\alpha_2 = \left(\frac{U}{V} \right)^3 \frac{2n^2}{(3+n)(3+2n)} = \left(\frac{1}{0,797} \right)^3 \frac{2(6,19)^2}{(3+6,19)(3+2 \cdot 6,19)} \Rightarrow \alpha_2 = 1,07$$

Fazendo-se $K_e = 0,5$ (borda viva [54]), e voltando-se à equação 67, tem-se:

$$\Delta H = \left[\frac{(0,0067)(1,5)}{(0,07)} + 0,5 + (1,07 - 1) \right] \frac{0,35^2}{2(9,81)} \Rightarrow \Delta H = 0,0045m$$

Refazendo-se os cálculos para um tubo corrugado de rugosidade $\epsilon = 0,5 \text{ cm}$ (= 0,005m), tem-se:

$$f = \left\{ \left(\frac{64}{24.257} \right)^8 + 9,5 \left[\ln \left(\frac{0,005}{3,7 \cdot 0,07} + \frac{5,74}{24.257^{0,9}} \right) - \left(\frac{2500}{24.257} \right)^6 \right]^{-16} \right\}^{0,125} \Rightarrow f = 0,082$$

$$\Delta H = \left[\frac{(0,082)(1,5)}{(0,07)} + 0,5 + (1,07 - 1) \right] \frac{0,35^2}{2(9,81)} \Rightarrow \Delta H = 0,0145m$$

Portanto valores muito baixos das perdas de carga no sifão trompa (4,5 mm para tubo liso de PVC e 14,5mm para tubo corrugado) podendo-se desprezar este valor em relação às perdas de cargas usuais em bacias sanitárias comerciais que possuem um trajeto tortuoso.

2.2.4 Cálculo do volume da sifonagem da trompa

Para o cálculo do volume da sifonagem utiliza-se os desenhos a seguir, baseados no trabalho de Mendes [50]:

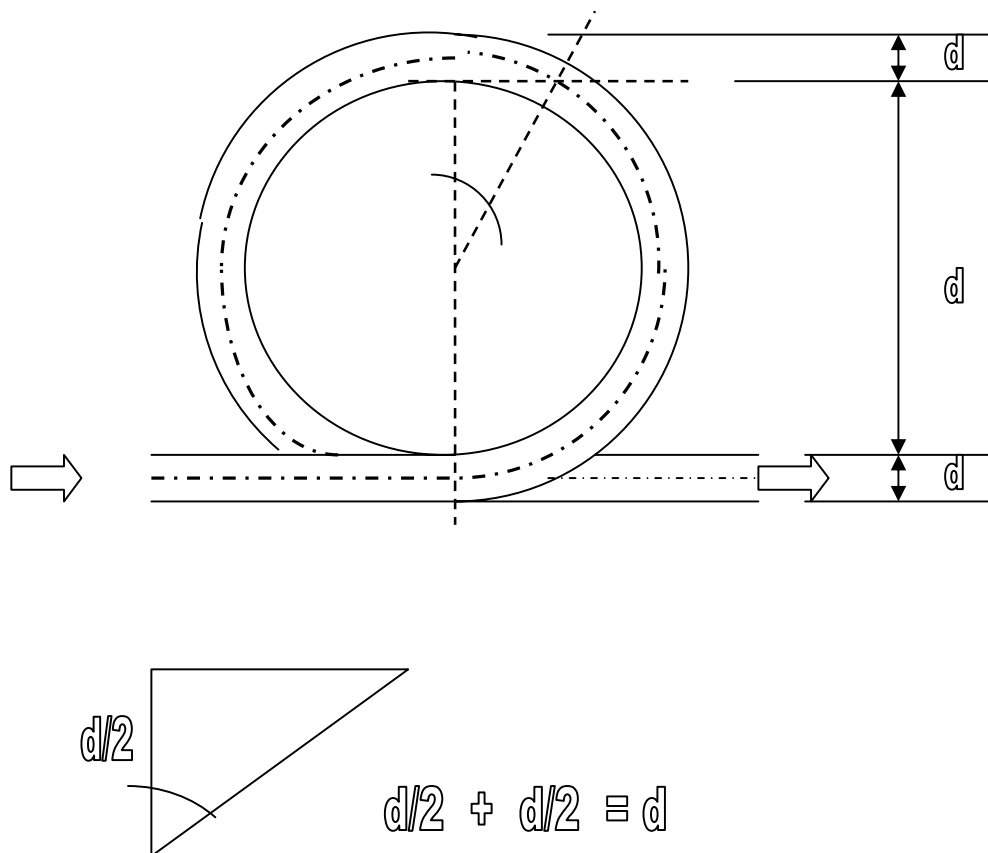


Figura 38: Croquis para auxílio do volume de água no fecho hídrico do sifão-trompa

Calculando-se o ângulo Θ através da figura anterior, tem-se:

$$\theta = \arccos\left(\frac{d}{2}\right) \Rightarrow \theta = 60^\circ$$

O volume da trompa, até a altura de sifonagem, pode ser expresso por:

$$V_{tr} = \left(\frac{180^\circ - \theta}{360^\circ}\right) S_o L_t = \left(\frac{180^\circ - 60^\circ}{360^\circ}\right) 0,004 \cdot 0,07 \cdot 1,5$$

$$\Rightarrow V_{tr} = 1,4 \cdot 10^{-4} m^3 (= 0,14 \text{ litros})$$

Somando-se ao valor obtido anteriormente, obtém-se o valor total do líquido armazenado nesta região, ou seja:

$$V = 0,58 + 0,14 \Rightarrow V = 0,72 \text{ litros}$$

2.2.5 Forças hidráulicas atuantes

A partir dos valores calculados anteriormente, pode-se estimar a aceleração de Coriolis, citado em Grimm [41], através da equação:

$$F_{CO} = 2\Omega V \text{sen}\Phi \quad \dots \text{ (Equação 68)}$$

Sendo:

F_{co} = Força de Coriolis [N];

Ω = velocidade angular da Terra = 2π [rad/dia] = $7,292 \times 10^{-5} s^{-1}$;

V = velocidade em relação à rotação da Terra [m/s];

Φ = latitude do local (para a cidade de São Paulo = $23^\circ 32,0'$ Sul [2]).

Substituindo-se os valores acima na equação 68, obtém-se a Força de Coriolis:

$$F_{CO} = 2(7,292 \times 10^{-5})(0,35) \text{sen}(23^\circ 32,0') \Rightarrow F_{CO} = 2,038 \cdot 10^{-5} N$$

Comparando-se o valor acima com a Força devida à Quantidade de Movimento, tem-se:

$$F = \rho Q v = 998,2 \times (1,38 \times 10^{-3}) \times 0,35 \Rightarrow F = 0,482 N$$

$$\frac{F_{CO}}{F} = \frac{2,038 \times 10^{-5}}{0,482} = 0,004\%$$

Ou seja, desprezível neste caso, implicando-se que a escolha do giro do redemoinho (horário ou anti-horário) não tem efeito representativo neste caso, em concordância com os estudos de Shapiro [65], em pias de cozinha.

Pressão do jato sobre A_h

Pode-se estimar a pressão do jato periférico a partir do esquema abaixo:

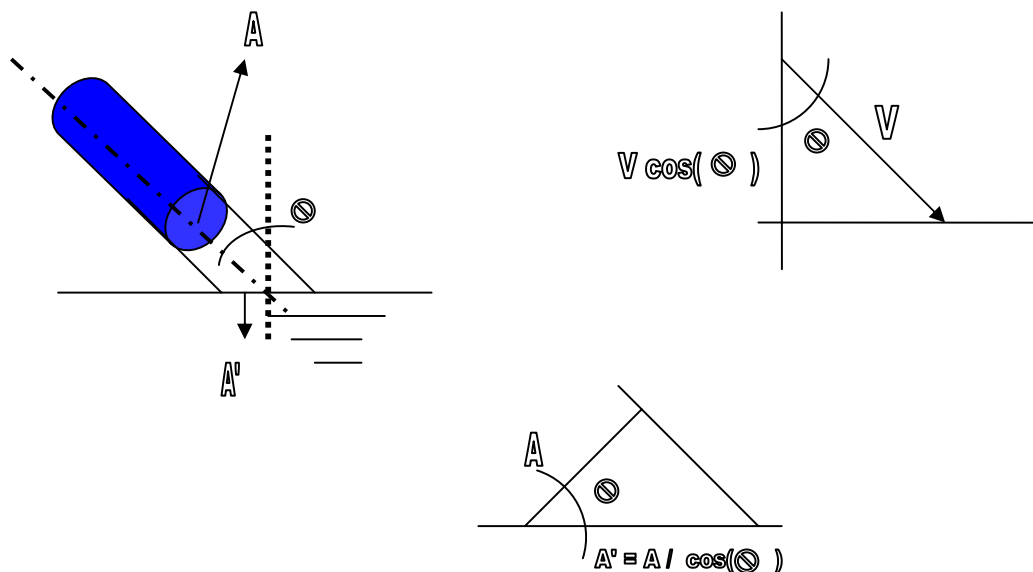


Figura 39: Croquis para auxílio do cálculo da pressão sobre a superfície do poço

Partindo-se da definição de pressão (força / área de aplicação) e do impulso (força x intensidade de aplicação), tem-se:

$$P = \frac{F}{A'} = \frac{\frac{mv \cos \theta}{\Delta t}}{\frac{A}{\cos \theta}} \quad \dots \text{ (Equação 69)}$$

Expressando-se o valor do impulso em função da força e do intervalo de tempo, tem-se:

$$I = F \cdot \Delta t = mv \cos \theta \quad \dots \text{ (Equação 70)}$$

Introduzindo-se o conceito de massa específica, ou seja:

$$m = \rho \forall \quad \dots \text{ (Equação 71)}$$

Com os valores obtidos nesta seção pode-se retomar a equação 69, ou seja:

$$P = \frac{F}{A'} = \frac{\frac{\rho \forall v \cos \theta}{\Delta t}}{\frac{A}{\cos \theta}} = \frac{\frac{\rho A H v \cos \theta}{\Delta t}}{\frac{A}{\cos \theta}} = \frac{\frac{\rho A v \Delta t v \cos \theta}{\Delta t}}{\frac{A}{\cos \theta}} \Rightarrow P = \rho v^2 \cos^2(\theta) \quad \dots \text{ (Equação 72)}$$

Substituindo-se os valores já obtidos anteriormente, tem-se:

$$P = 998,2(2,33)^2 \cos^2(63,6) \Rightarrow P = 32,7 \text{ N/m}^2 (= 32,7 \text{ Pa})$$

Podendo-se estimar a porcentagem da superfície do poço que recebe esta pressão através da relação:

$$\frac{A'}{Ah} = \frac{\frac{\pi \times 0,04^2 / 4}{\cos(63,6^\circ)}}{0,029} \Rightarrow \frac{A'}{Ah} \cong 9,75\%$$

Portanto, o jato em questão atinge aproximadamente 10% da área visível do poço.

2.2.6 Verificações do desconector (anexo C da NBR 8160:1999)

Nesta seção, verifica-se o comportamento do desconector da bacia sanitária em relação às depressões e sobrepressões admissíveis do sistema, são ultrapassados ou não.

2.2.6.1 Retomada histórica

Nesta parte deste trabalho, vale relembrar alguns fatos verificados pelo Eng° Herr Uma, citado em Landi [47], em experiências de 1890, quando das experiências da Torre Hidráulica (ver figura 1):

- “- Nos tubos de queda de pequeno diâmetro a água ao cair enchia completamente o tubo, resultando no esvaziamento dos sifões (sifonagem induzida);*
- com diâmetros maiores pode observar que a entrada de água na conexão do tubo de queda se abria na forma de hélice ao longo da superfície interna do tubo. À medida que se aumentava a vazão de água, a ‘hélice’ de água ia aumentando até fechar completamente o escoamento;*
- Um anemômetro foi instalado no topo do tubo de queda. Para descarga de um vaso sanitário ele mediu a aspiração de 60 a 90 litros de ar, conforme a vazão adotada;*
- Quando o coletor predial não tinha o sifão de saída (solução comumente adotada então), o escoamento era muito mais fácil (a regulamentação de Colônia, a partir daí, proibiu esse sifão);*
- Um conjunto de medidas foi feito também para verificar as condições de sifonagem, e ao mesmo tempo auto-limpeza dos sifões. Usou para isso sifões de vidro (e já se notava que eram mais lisos que os sifões de chumbo ou aço) verificando e sugerindo que o fecho hídrico não deveria ser maior do que 10mm para garantir uma eficiente limpeza;*
- Experiências foram feitas também para medir o tempo de evaporação dos sifões. À temperatura de 20°C, verificou-se a evaporação de 10mm por semana”.*

2.2.6.2 Verificação da suficiência de ventilação primária

Aplicando-se o equacionamento recomendado pelo Anexo C da NBR 8160:1999 [27], com detalhamento de cálculo em Graça [40] e Montenegro [51], e seguindo-se o fluxograma proposto por Santos [63] (Figura 40) para o Sistema Predial de Esgoto Sanitário (SPES), tem-se:

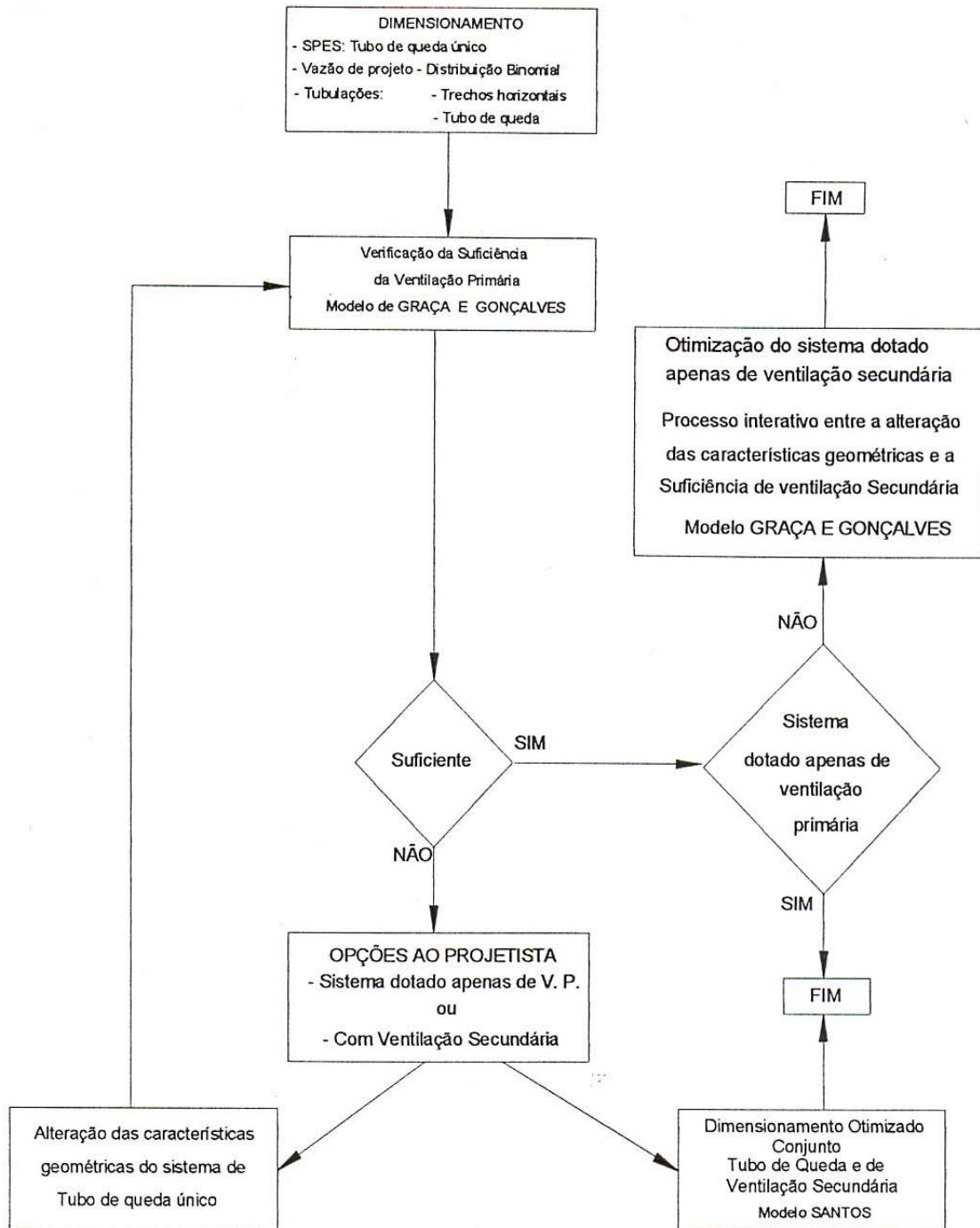


Figura 40: Fluxograma representativo do Modelo Aberto de Dimensionamento Otimizado dos SPES. [63].

No modelo de verificação da suficiência da ventilação primária, as inequações a seguir são verificadas:

- $H_{a,i} \geq H_{r,i}$
- $D_{a,s} \geq D_r$
- $S_{a,s} \geq S_r$

onde:

$H_{a,i}$ = perda de altura do fecho hídrico admissível no sistema

$H_{r,i}$ = perda de altura do fecho hídrico por auto-sifonagem

$D_{a,s}$ = depressão admissível no sistema

D_r = depressão máxima no sistema

$S_{a,s}$ = sobrepressão admissível no sistema

$S_{a,s}$ = sobrepressão máxima no sistema

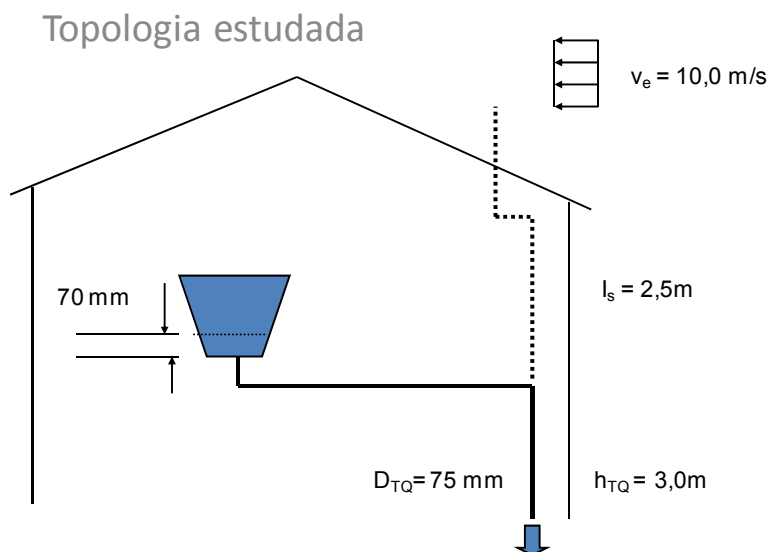


Figura 41: Topologia estudada para verificação do desconector

1) Cálculo da altura do fecho hídrico admissível no sistema

$H_{0,1}$ = altura do fecho hídrico inicial do desconector: 70,00 mm (croqui Mendes);

$C_{0,1}$ = coeficiente de evaporação do desconector: $8 \times 10^{-3} \text{ mm.m}^2/\text{semana}$ (tabela C.1 da Norma citada);

Π = pressão de vapor d'água do ar saturado na temperatura ambiente: 3165,9 Pa

(25°C – tabela C.2 da Norma citada);

Δt = duração máxima da exposição à evaporação do fecho hídrico do desconector:

4,5 semanas (valor usual recomendado pela Norma citada);

y = umidade relativa do ambiente: 0,7 (adotado).

De acordo com a fórmula (3) da NBR 8160:1999 – anexo C:

$$h_{e,i} = C_{e,i} \Pi (1 - y) \Delta t \quad \dots \text{(Equação 73)}$$

Sendo $h_{e,i}$ = altura do fecho hídrico perdida por evaporação no desconector, em milímetros.

Substituindo os valores:

$$h_{e,i} = 8 \times 10^{-3} \times 3165,9 (1 - 0,7) 4,5 \Rightarrow h_{e,i} = 34,2 \text{ mm}$$

Calculando-se o valor admissível:

$$H_{a,i} = H_{0,i} - h_{e,i} = 70,00 - 34,2 \Rightarrow H_{a,i} = 35,8 \text{ mm}$$

Considerando-se que o escoamento nos ramais seja livre, conforme premissa de dimensionamento do SPES desconsidera-se o fenômeno da auto-sifonagem, ou seja, $H_{r,i,m} = 0$ mm.

Portanto:

$$H_{a,i} > H_{r,i,m}$$

Sendo aceita esta condição.

2) Cálculo da depressão admissível no sistema

Calculando-se inicialmente a perda máxima da altura do fecho hídrico devido à depressão no desconector ($H_{s,i}$), em mm:

$$H_{s,i} = \frac{0,102 \gamma H_{0i}}{(1 + Rv_i)} \quad \dots \text{(Equação 74)}$$

Sendo:

γ = peso específico da água: 9,81 N/m³;

H_{0i} = 70 mm (já definido anteriormente);

R_v = relação entre os volumes das câmaras de entrada e saída do desconector

A partir do Modelo de Mendes, pode-se calcular os volumes de entrada (V_e) e saída (V_s) do desconector, recorrendo-se à Figura 21:

$$V_e = 0,58 + \frac{1.000\pi 0,35(0,07)^2}{4} \Rightarrow V_e = 1,93 \text{ litros}$$

$$V_s = \frac{1.000\pi 0,50(0,07)^2}{4} \Rightarrow V_s = 1,92 \text{ litros}$$

$$R_v = \frac{V_e}{V_s} = \frac{1,93}{1,92} \Rightarrow R_v \cong 1,00$$

Substituindo os valores acima:

$$H_{s,i} = \frac{0,102 \times 9,81 \times 70,0}{(1 + 1,00)} \Rightarrow H_{s,i} = 35,02 \text{ mm}$$

Comparando-se com o valor admissível:

$$H_{a,i} = 35,8 \text{ mm} > H_{s,i} = 35,02 \text{ mm}$$

Portanto pode-se adotar a formulação:

$$D_{a,i} = 9,81(1 + R_v)H_{a,i} \quad \dots \text{ (Equação 75)}$$

Substituindo-se os valores já obtidos anteriormente:

$$D_{a,i} = 9,81(1 + 1,00)35,8 \Rightarrow D_{a,i} = 702,40 \text{ Pa}$$

3) Cálculo da depressão resultante do efeito de sifonagem induzida

$$D_{r,si} = K_{TQ} Q_{AR}^2 \quad \dots \text{ (Equação 76)}$$

Sendo:

Q_{ar} = vazão de ar que escoar pelo núcleo do tubo de queda, calculado da seguinte forma:

$$Q_{ar} = \alpha Q_{TQ}^{2/5} - 1,5 Q_{TQ} \quad \dots \text{(Equação 77)}$$

Para o caso estudado:

$D_{TQ} = 75\text{mm}$ (diâmetro comercial com valor imediatamente superior ao diâmetro de saída do sifão trompa = 70,0mm);

$\alpha = 15,3$ (valor corresponde a 75mm na tabela C.4 da Norma citada);

$Q_{TQ} = Q_{VS} = 1,38$ litros / segundo (calculado no item 2.3.3 deste trabalho).

Substituindo os valores:

$$Q_{ar} = 15,3 \times 1,38^{2/5} - 1,5 \times 1,38 \Rightarrow Q_{ar} = 15,3 \text{ l/s}$$

Calculando-se K_{TQ} (coeficiente de máxima perda de pressão do ar no tubo de queda):

$$K_{TQ} = 4,9 \times 10^5 \left[\frac{1}{D_{TQ}^4} \left(1 + \frac{70 I_s}{D_{TQ}} + 0,4 n_c \right) + 2 \sum_{j=1, f=1}^{R_s} \left(\frac{k_i}{(D_{TQ} - 2e_i)^4} \right) \right] \quad \dots \text{(Equação 78)}$$

Sendo:

n_c = número de curvas na parte seca do tubo de queda = 2 (adotado);

I_s = comprimento da parte seca do tubo de queda = 2,5m (adotado).

Calculando-se por parcelas:

$$A = \frac{1}{D_{TQ}^4} \left(1 + \frac{70 I_s}{D_{TQ}} + 0,4 n_c \right) \quad \dots \text{(Equação 79)}$$

Substituindo os valores:

$$A = \frac{1}{75^4} \left(1 + \frac{70 \cdot 2,5}{75} + 0,4 \cdot 2 \right) \Rightarrow A = 1,31 \cdot 10^{-7}$$

Calculando-se a segunda parcela:

$$B = 2 \sum_{j=1, l=1}^{R, s} \left(\frac{k_i}{(D_{TQ} - 2e_i)^4} \right) \quad \dots \text{ (Equação 80)}$$

Considerando apenas 1 bacia sanitária, tem-se:

$$e_i = 25 \left(\frac{Q_{TQ}}{D_{TQ}} \right)^{3/5} = 25 \left(\frac{1,38}{75} \right)^{3/5} \Rightarrow e_i = 2,27 \text{ mm}$$

Sendo:

e_i = espessura da coroa circular no trecho considerado do tubo de queda;

k_i = coeficiente de perda de pressão do ramal considerado: 9 (tabela C.5 da Norma citada).

Substituindo os valores:

$$B = 2 \left(\frac{9}{(75 - 2,27)^4} \right) \Rightarrow B = 7,3 \cdot 10^{-7}$$

Voltando-se à fórmula de K_{TQ} , na equação 78, tem-se:

$$K_{TQ} = 4,9 \cdot 10^5 [A + B] = 4,9 \cdot 10^5 [1,31 \cdot 10^{-7} + 7,3 \cdot 10^{-7}] \Rightarrow K_{TQ} = 0,42$$

Portanto:

$$D_{r,si} = K_{TQ} Q_{AR}^2 = (0,42)(15,3)^2 \Rightarrow D_{r,si} = 98,72 \text{ Pa}$$

3) Cálculo da depressão devida à tiragem térmica e ação do vento ($D_{r,tv}$):

O item c.2.2.2.2 recomenda a seguinte formulação:

$$D_{r,TV} = 176,77 \left(-19,62 h_{TQ} \frac{\Delta \theta_i}{\theta_i \theta_e} + \varepsilon \frac{v_e^2}{\theta_e} \right) \quad \dots \text{(Equação 81)}$$

Sendo:

h_{TQ} = altura do tubo de queda: 3,0m (adotado);

θ_i = temperatura do ar exterior: 20°C = 293K (adotado);

θ_e = temperatura do ar no interior do tubo de queda: 5°C = 278K (adotado);

V_e = velocidade do vento: 10 m/s (adotado);

ε = -0,6 (tubo ventilador primário elevado em relação à laje ou telhado – adotado).

Substituindo os valores:

$$D_{r,TV} = 176,77 \left((-19,62)(3,0) \frac{(293-278)}{(293 \times 278)} + (-0,6) \frac{10^2}{278} \right)$$

$$\Rightarrow D_{r,TV} = -40,07 Pa \text{ (depressão)}$$

4) Cálculo da depressão devida às pressões ambientais ($D_{r,amb}$):

Pode-se considerar este valor desprezível em condições normais, ou seja,

$$\Rightarrow D_{r,amb} = 0 Pa$$

Pode-se, neste caso calcular a depressão máxima resultante (D_r):

$$D_r = \max(|D_{r,s}|; |D_{r,TV}| + I|D_{r,amb}|) \quad \dots \text{(Equação 82)}$$

Substituindo os valores já obtidos:

$$D_r = \max(|98,72|; |-40,07| + I|0,00|) \Rightarrow D_r = 98,72 Pa$$

Comparando-se com o valor da depressão admissível, tem-se:

$$D_{a,s} = 702,40 Pa > D_r = 98,72 Pa$$

Sendo aceita esta condição.

4) Cálculo da sobrepressão máxima no sistema ($S_{a,s}$):

O item c.2.1.3 da norma citada recomenda a seguinte formulação:

$$S_{a,i} = \min \left[\frac{(1 + R_v)^2 H_{a,i} \gamma}{R_{v,i}}; R_{v,i} \gamma H_{0,i} \right] \quad \dots \text{(Equação 83)}$$

Pois, no caso deste trabalho: $R_v = 1,00 \geq 1$

Adotando-se os valores já calculados anteriormente:

$$S_{a,i} = \min \left[\frac{(1 + 1,00)^2 (35,2)(9,81)}{1,00}; 1,00(9,81)(70,0) \right] = \min[690,62,4; 686,7]$$

Portanto:

$$S_{a,i} = 686,7 Pa$$

5) Cálculo da sobrepressão máxima resultante da ação combinada de sobrepressão e das variações da pressão ambiental (S_r):

$$S_r = S_{r, sb} + I_2 |S_{r, amb}| \quad \dots \text{(Equação 84)}$$

Considerando-se desprezível a depressão devida ao ambiente e $I_2 = 0$ para ambientes de pressão positiva, tem-se:

$$S_r = 0,0 + 0,0 |S_{r, amb}| \Rightarrow S_r = 0,0$$

Comparando-se com o valor da sobrepressão admissível, tem-se:

$$S_{a,i} = 686,7 Pa > S_r = 0,0 Pa$$

Também se aceitando esta condição.

Resumindo os cálculos efetuados:

Variável analisada	Valor admissível	Valor resultante	Conclusão
Altura do fecho hídrico	$H_{a,i} = 35,8mm$	$H_{s,i} = 35,02mm$	Aceitar valores
Depressões máximas no sistema	$D_{a,i} = 702,40Pa$	$D_r = 98,72Pa$	Aceitar valores
Sobreprensões máximas no sistema	$S_{a,i} = 686,7Pa$	$S_r = 0,0Pa$	Aceitar valores

Podendo-se, portanto, adotar o diâmetro de 75mm para o tubo de queda da bacia sanitária, com as condições descritas no cálculo, para o critério de ventilação.

2.3.6.3 Estimativa da velocidade terminal

A velocidade terminal pode ser entendida, conforme Santos [63]:

“O esgoto escoar no formato de um cilindro oco aderido à parede do tubo numa velocidade de escoamento até atingir um valor máximo e constante, a qual é denominada velocidade terminal”.

Verifica-se, pela Figura 41 a seguir, tratar-se de um fenômeno complexo, em várias etapas, constituídas com incorporações de ar, água e sólidos. Comparando-se os estudos de 3 pesquisadores, tem-se:

$$Dawson : V_t = 5,18 \left(\frac{Q}{D} \right)^{0,4} \quad \dots \text{(Equação 85)}$$

$$Wyly: V_t = 4,02 \left(\frac{Q}{D} \right)^{0,4} \quad \dots \text{ (Equação 86)}$$

Onde:

Q = vazão de saída no ramal de descarga [l/s]

D = diâmetro do ramal de descarga ["]

(adotado pela American Society of Plumbing Engineers (ASPE) – capítulo 17)

$$Cheng: V_t = \frac{g}{\zeta_w} \quad \dots \text{ (Equação 87)}$$

Onde:

g = aceleração da gravidade [m/s²]

Sendo os valores de ζ_w obtidos empiricamente:

Tabela 6: Valores de ζ_w (fonte: Cheng [30])

Vazão Q (l/s)	Valores de ζ_w
1,0	3,10
2,0	2,20
3,0	1,85
4,0	1,50

Na Figura 42 nota-se a complexidade dos equacionamentos pois ocorrem 4 zonas:

Zona "A": entrada de ar;

Zona "B": entrada lateral da água

Zona "C": mistura ar / água

Zona "D": ramal horizontal

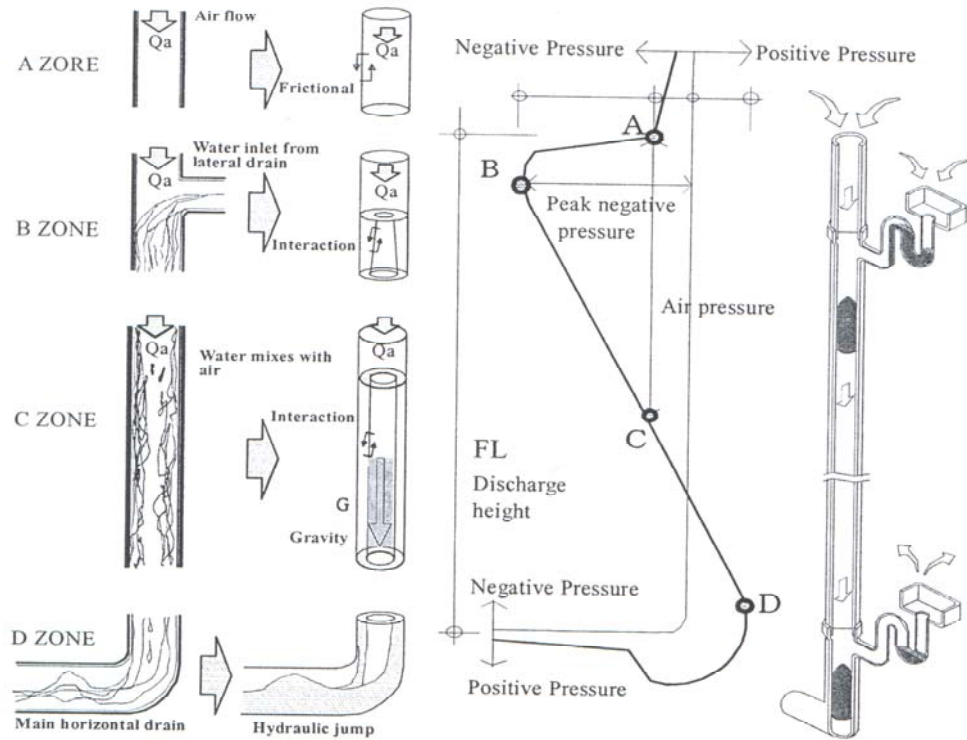


Figura 42: Mecanismo hidráulico no tubo de queda (Cheng [30])

Substituindo-se o valor da vazão já obtida anteriormente neste trabalho:

$$Dawson : V_t = 5,18 \left(\frac{1,38}{3''} \right)^{0,4} \Rightarrow V_t = 3,80 m/s$$

$$Wyly : V_t = 4,02 \left(\frac{1,38}{3''} \right)^{0,4} \Rightarrow V_t = 2,94 m/s$$

$$Cheng : V_t = \frac{9,81}{2,54} \Rightarrow V_t = 3,86 m/s$$

(valor de ζ_w obtido, por simplificação, por interpolação linear)

Também pode-se estimar o comprimento terminal que o sólido irá atingir a velocidade terminal na tubulação, através da formulação proposta no capítulo 17 da American Society of Plumbing Engineers (ASPE), citada em Santos [63], ou seja:

$$L_t = 0,17V_t^2$$

...(Equação 88)

Sendo:

L_t = comprimento terminal (metros).

Substituindo-se os valores obtidos da velocidade terminal:

$$Dawson : L_t = 0,17(3,80)^2 \Rightarrow L_t \cong 2,45m$$

$$Wyly : L_t = 0,17(2,94)^2 \Rightarrow L_t \cong 1,47m$$

$$Cheng : L_t = 0,17(3,86)^2 \Rightarrow L_t \cong 2,53m$$

Percebe-se, portanto, uma variação destes valores, necessitando um estudo mais aprofundado do tema.

3 Estudos Experimentais

Os estudos experimentais envolverão o modelo utilizado por *Mendes* [13] em sua Dissertação de Mestrado, sendo complementado por um reservatório transparente de um metro de altura, com aferição de volume realizada por instrumentação eletrônica do CTH (Centro Tecnológico da Hidráulica).

Os ensaios consistirão na medição do nível do reservatório de controle correlacionando-se este com o tempo, através da filmagem, para posterior plotagem do gráfico. A lei obtida por ajuste para a variação do nível no tempo $h(t)$ permitirá a obtenção das funções Vazão de saída $Q(t)$ e velocidade de saída $V(t)$. Estas funções serão utilizadas para a função Força Hidrodinâmica induzida pelo escoamento e que corresponde ao fluxo da Quantidade de Movimento, ou seja, $F(t) = \rho Q(t) V(t)$.

Expressando-se $V(t)$ em função de $Q(t)$, percebe-se que $F(t) \sim Q^2(t)$ e que na vazão máxima corresponde à máxima força de arraste.

3.1 Equacionamento

A Figura 38 representa o reservatório de descarga (RD) e neste será aplicado um volume de controle para o equacionamento procurado.

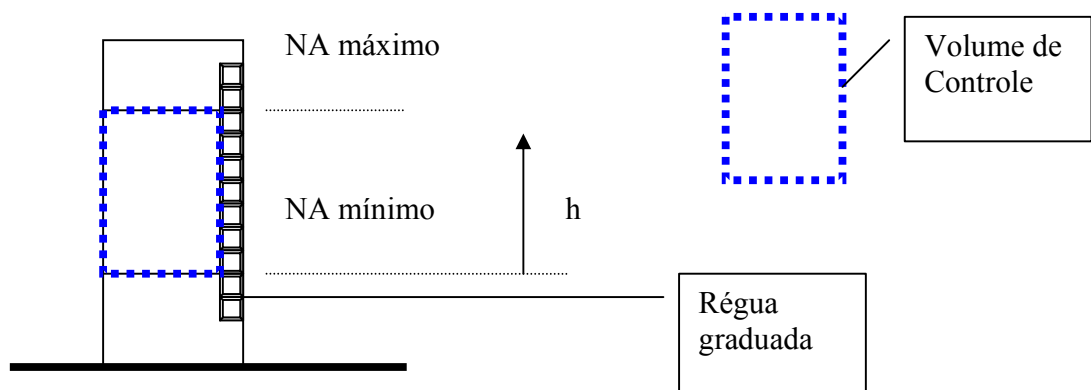


Figura 43: Definição do volume de controle do reservatório de descarga (RD)

Para este Equacionamento, utilizou-se a Equação da Conservação da Massa na Forma Integral, no Volume de Controle da Figura 43, ou seja:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho dV + \int_{SC} \rho \vec{v} d\vec{A} = 0 \quad \dots \text{(Equação 89)}$$

Aproximando-se para um fluxo constante, obtém-se a equação abaixo:

$$\frac{\partial}{\partial t} (Ah) - Q = 0 \quad \dots \text{(Equação 90)}$$

A vazão de saída pode ser expressa através da área da seção transversal do reservatório e da variação do nível através da equação:

$$Q = A_{RD} \frac{dh}{dt} (\text{reservatório}) \quad \dots \text{(Equação 91)}$$

Onde:

A_{RD} = área transversal do reservatório de descarga [m^2]

Também pode-se expressar a vazão através dos parâmetros da tubulação de saída, ou seja:

$$Q = \frac{\pi D^2}{4} v(\text{tubo}) \quad \dots \text{(Equação 92)}$$

Igualando-se as equações 91 e 92 e isolando-se a velocidade de enchimento do reservatório de descarga, tem-se:

$$v_{RD} = \left(\frac{4 A_{RD}}{\pi D^2} \right) \frac{dh}{dt} \quad \dots \text{(Equação 93)}$$

Outra informação importante a obter é a força de arraste a partir da vazão de saída do modelo, ou seja:

$$F = \rho Q v = \rho \frac{Q^2}{(\pi D^2)/4} \Rightarrow F = \left(\frac{4\rho}{\pi D^2} \right) Q^2 \quad \dots \text{(Equação 94)}$$

Foram realizados ensaios no modelo de Mendes [50], seguindo-se os passos abaixo descritos:

1) Aferição do reservatório de descarga (RD)

Aferiu-se a célula de carga através da Tabela 7, executado pela Instrumentação Eletrônica do CTH:

Tabela 7 : Tabela resumo da aferição da célula de carga

CALIBRAÇÃO DE CÉLULA DE CARGA

AFERIÇÃO:	CELULA DE CARGA	S-20	FABRICANTE:	ALFA
MODÉLO:	S - 20	20 kgf	INTERESSADO:	FCTH
AJUSTE LINEAR:	Y (kgf) = A + B * X (volt)		FAIXA:	0 a 20,0 kgf
B =	-3,9953	0,0134 = A	PARES DE DADOS:	31
EP_B =	0,0008	0,0020 = EP_A		
coef. R2				
=	0,999999	0,0063 = EP_Y	DATA:	17/7/2008 EP - erro padrão
obs.:	condicionador Kyowa			
obs.:	padrão peso do manômetro peso morto			

X (volt)	Y (kgf)	Yc (kgf)	Erro (kgf)	Erro %	Erro %
(medido)	(medido)	(calc)	(Y - Yc)	(pontual)	(fund.esc)
-0,001	0,000	0,017	-0,017	-100,00	-0,09
-0,247	1,000	1,000	0,000	-0,02	0,00
-0,496	2,000	1,995	0,005	0,25	0,02
-0,748	3,000	3,002	-0,002	-0,06	-0,01
-0,998	4,000	4,001	-0,001	-0,02	0,00
-1,247	5,000	4,996	0,004	0,09	0,02
-1,496	6,000	5,990	0,010	0,16	0,05
-1,748	7,000	6,997	0,003	0,04	0,01
-1,998	8,000	7,996	0,004	0,05	0,02
-2,247	9,000	8,991	0,009	0,10	0,05
-2,498	10,000	9,994	0,006	0,06	0,03
-3,000	12,000	11,999	0,001	0,01	0,00
-3,501	14,000	14,001	-0,001	-0,01	0,00
-4,002	16,000	16,002	-0,002	-0,02	-0,01
-4,502	18,000	18,000	0,000	0,00	0,00
-5,004	20,000	20,006	-0,006	-0,03	-0,03

Tabela 8 - continuação: Tabela resumo da aferição da célula de carga

-4,504	18,000	18,008	-0,008	-0,04	-0,04
-4,002	16,000	16,002	-0,002	-0,02	-0,01
-3,502	14,000	14,005	-0,005	-0,03	-0,02
-3,001	12,000	12,003	-0,003	-0,03	-0,02
-2,500	10,000	10,002	-0,002	-0,02	-0,01
-2,248	9,000	8,995	0,005	0,06	0,03
-1,998	8,000	7,996	0,004	0,05	0,02
-1,747	7,000	6,993	0,007	0,10	0,03
-1,497	6,000	5,994	0,006	0,09	0,03
-1,247	5,000	4,996	0,004	0,09	0,02
-0,997	4,000	3,997	0,003	0,08	0,02
-0,747	3,000	2,998	0,002	0,07	0,01
-0,499	2,000	2,007	-0,007	-0,35	-0,04
-0,248	1,000	1,004	-0,004	-0,42	-0,02
0,000	0,000	0,013	-0,013	-100,00	-0,07

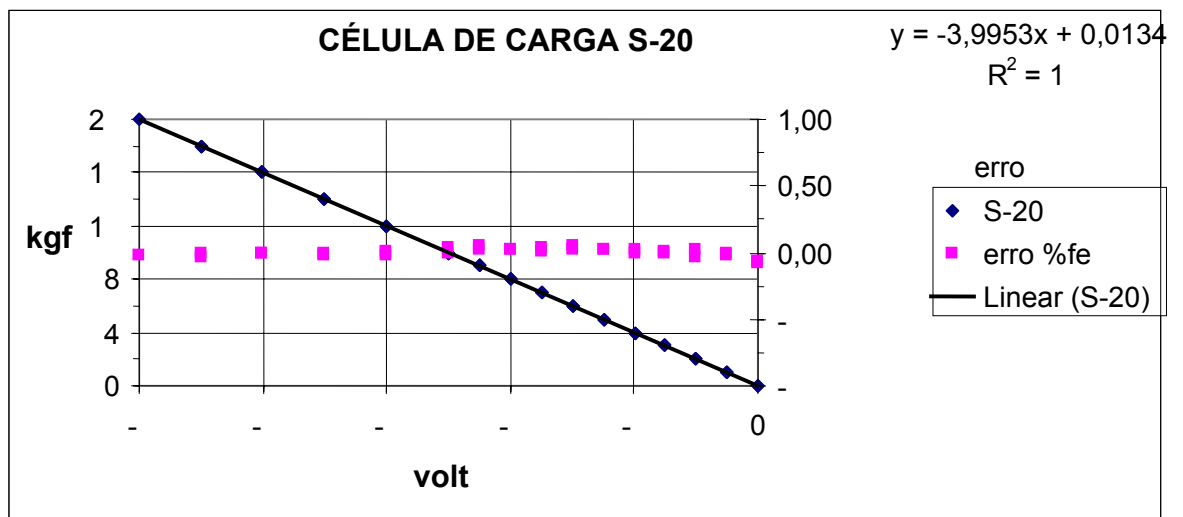


Figura 44 : Aferição da célula de carga



Figura 45: Célula de carga S-20 utilizada na aferição do nível do RD

2) Obtenção do peso do RD

Utilizando-se a célula de carga aferida, foi obtido o valor de $-1,088\text{V}$ que corresponde à $4,3603\text{ kgf}$.



Figura 46: Obtenção do peso do RD

3) Obtenção do Nível inferior

Colocou-se água acima das saídas do reservatório e fez a medida, obtendo-se o valor de $-1,640V$, corresponde à $6,6005 \text{ kgf}$, ou seja, à $2,2454 \text{ kgf}$ de água.

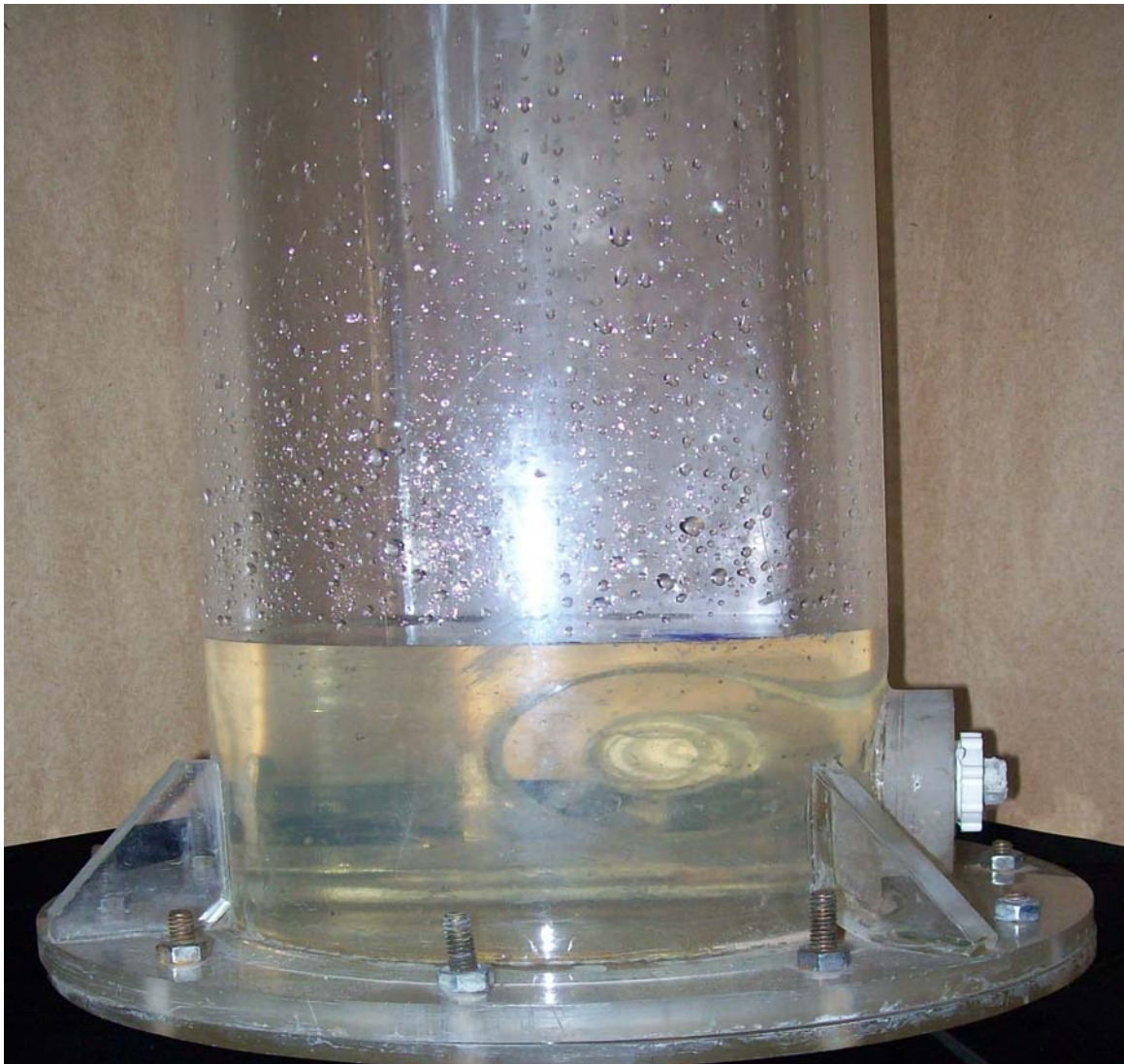


Figura 47: Colocação do nível inferior de água

3) Obtenção do Nível superior

Colocou-se água até obter o valor de -4,150V, corresponde à 10,000 kg de água no reservatório, correspondendo a uma altura $h = 0,70\text{m.}$, conforme Figura 46.

Neste caso, pode-se escrever a massa em função da massa específica e do volume, ou seja:

$$m = \rho Vol \quad \dots \text{ (Equação 95)}$$

Substituindo-se os valores obtidos na parte experimental:

$$10 = \rho(hA_{RD}) \Leftrightarrow A_{RD} = \frac{10}{(1.000)(0,7)} \Rightarrow A_{RD} = 0,01429\text{m}^2$$



Figura 48: Colocação do nível superior de água até obter 10,000 kgf

A Figura 49 ilustra a montagem do experimento no Laboratório didático do Centro Tecnológico da Hidráulica (CTH), constituído de uma caixa de descarga alta, de plástico, obtida no comércio de São Paulo, fixada na altura recomendada pelo fabricante, ou seja, à 2,00 metros do nível equivalente ao piso acabado, sendo abastecida pela rede do laboratório.

Na parte inferior da caixa, também seguindo as recomendações do fabricante, foi instalado um tubo de descida externo que faz a ligação com a lateral do modelo de Mendes, localizado à 0,035m da parte superior deste modelo, fixado à alvenaria através de braçadeiras metálicas.

O modelo de Mendes foi fixado à uma bancada de madeira que consegue absorver os esforços devidos ao funcionamento do sistema, sendo equivalente à fixação através de parafusos na parte inferior de uma bacia sanitária usual do mercado brasileiro.

A saída do modelo se faz através da parte central, utilizando-se o sifão-trompa que descarrega o escoamento no reservatório de descarga graduado.

Para resumir a descrição acima, pode-se recorrer às Figuras 49 e 50 a seguir.

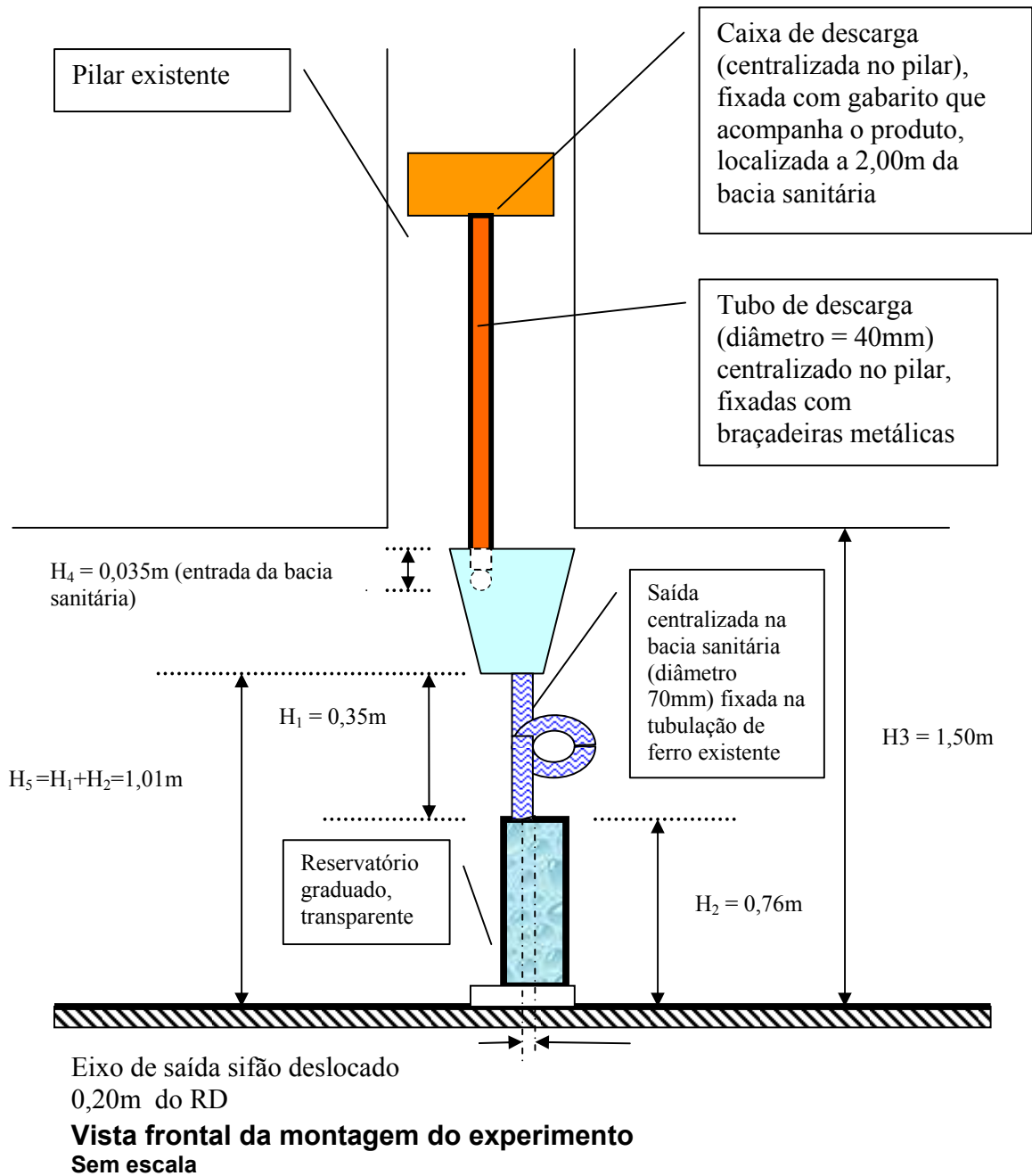
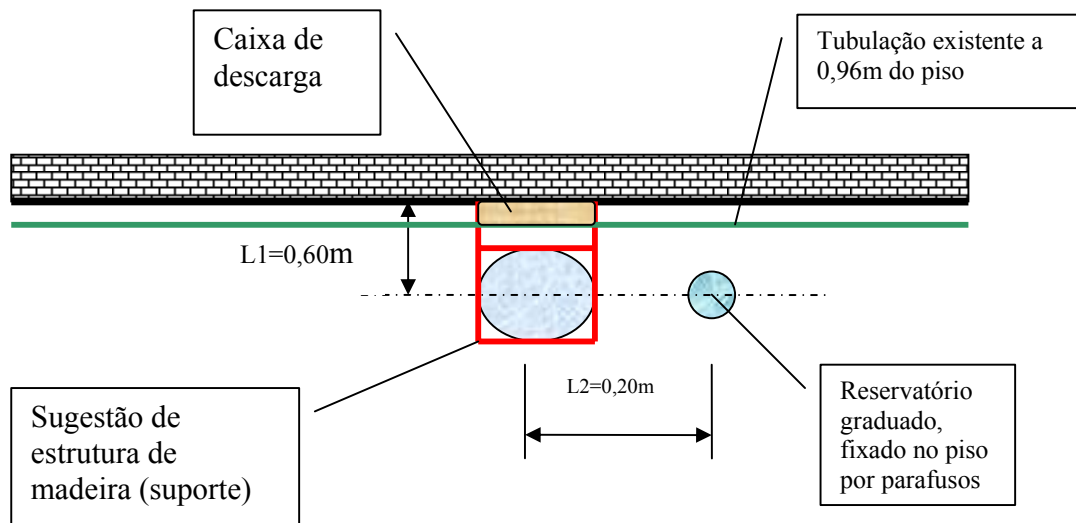


Figura 49: Vista frontal da montagem do experimento



Planta
Sem escala

Figura 50: Vista lateral da montagem do experimento

3.2 Determinação do hidrograma a montante da tubulação de saída da bacia sanitária

Através da experimentação do modelo de Mendes [50], obtém-se os valores do nível do reservatório de descarga (RD) em função do tempo do experimento conforme Tabela 8, sendo que a graduação da régua foi posicionada com início na parte inferior do reservatório:

Tabela 9: Valores do nível do reservatório de descarga em função do tempo

Tempo (s)	Y (diferença de nível) [cm]	Nível Reservatório (cm)
0	0	64
1	8	59
2	17	47
3	23	41
4	26	38
5	27	37
6	27	37
7	27	37

A partir da Tabela 8, obtém-se a Figura 49, com a Curva Chave do fenômeno.

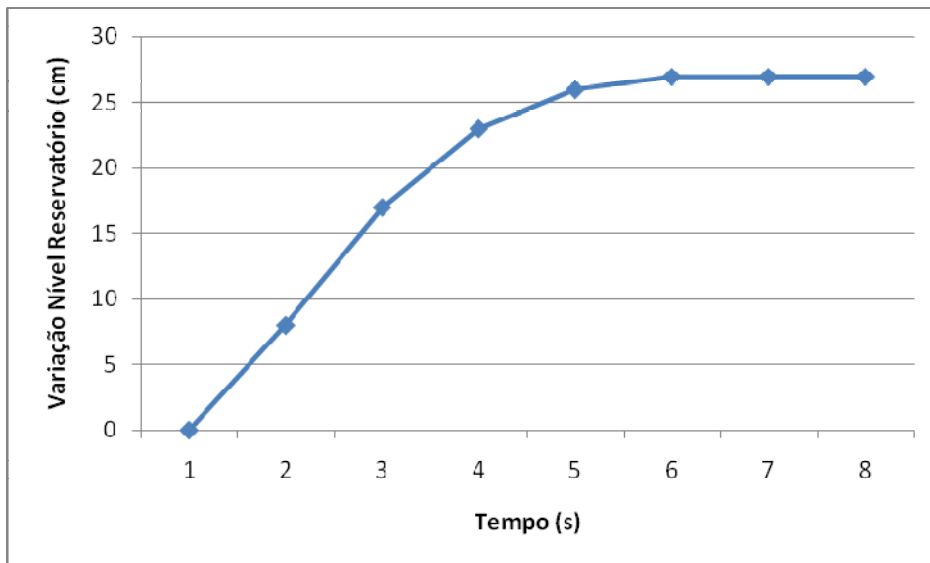


Figura 51: Curva chave do reservatório de descarga

A partir destes valores, pode-se utilizar as Transformadas de Lagrange [32] para obtenção dos valores do diferencial da altura em relação ao tempo:

Fazendo-se $\Delta t = 1$ s, tem-se:

$$\begin{aligned} \text{Ponto1: } \left(\frac{dh}{dt} \right)_1 &= \frac{1}{12\Delta t} (-25Y_1 + 48Y_2 - 36Y_3 + 16Y_4 - 3Y_5) = \\ &= \frac{1}{12 \times 1} (-25 \times 0 + 48 \times 8 - 36 \times 17 + 16 \times 23 - 3 \times 26) \Rightarrow v_1 = 5,17 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Ponto2: } \left(\frac{dh}{dt} \right)_2 &= \frac{1}{12\Delta t} (-3Y_1 - 10Y_2 + 18Y_3 - 6Y_4 + Y_5) = \\ &= \frac{1}{12 \times 1} (-3 \times 0 - 10 \times 8 + 18 \times 17 - 6 \times 23 + 1 \times 26) \Rightarrow v_2 = 9,50 \end{aligned}$$

$$\text{Ponto3: } \left(\frac{dh}{dt} \right)_3 = \frac{1}{12\Delta t} (Y_1 - 8Y_2 + 8Y_4 - Y_5) = \frac{1}{12 \times 1} (0 - 8 \times 8 + 8 \times 23 - 26) \Rightarrow v_3 = 7,83$$

$$\text{Ponto4: } \left(\frac{dh}{dt} \right)_4 = \frac{1}{12\Delta t} (Y_2 - 8Y_3 + 8Y_5 - Y_6) = \frac{1}{12 \times 1} (8 - 8 \times 17 + 8 \times 26 - 27) \Rightarrow v_4 = 4,42$$

$$\text{Ponto5: } \left(\frac{dh}{dt} \right)_5 = \frac{1}{12\Delta t} (Y_3 - 8Y_4 + 8Y_6 - Y_7) = \frac{1}{12 \times 1} (17 - 8 \times 23 + 8 \times 27 - 27) \Rightarrow v_5 = 1,83$$

$$\text{Ponto6: } \left(\frac{dh}{dt} \right)_6 = \frac{1}{12\Delta t} (Y_4 - 8Y_5 + 8Y_7 - Y_8) = \frac{1}{12 \times 1} (23 - 8 \times 26 + 8 \times 27 - 27) \Rightarrow v_6 = 0,33$$

$$\text{Ponto7: } \left(\frac{dh}{dt} \right)_7 = \frac{1}{12\Delta t} (-Y_4 + 6Y_5 - 18Y_6 + 10Y_7 + 3Y_8) =$$

$$= \frac{1}{12 \times 1} (-23 + 6 \times 26 - 18 \times 27 + 10 \times 27 + 3 \times 27) \Rightarrow v_7 = -0,17$$

(sendo arredondado para $V_7 = 0 \text{ m/s}$ por não haver precisão suficiente nas medidas efetuadas, sem prejuízo na análise hidráulica).

$$\text{Ponto 8: } \left(\frac{dh}{dt} \right)_8 = \frac{1}{12 \Delta t} (3Y_4 - 16Y_5 + 36Y_6 - 48Y_7 + 25Y_8) =$$

$$= \frac{1}{12 \times 1} (3 \times 23 - 16 \times 26 + 36 \times 27 - 48 \times 27 + 25 \times 27) \Rightarrow v_8 = 0,33$$

A partir dos valores acima e utilizando-se a Equação 91, obtém-se o hidrograma a montante do tubo de saída do sifão trompa, sendo que as denominações “linhas” correspondem ao tempo decorrido no experimento:

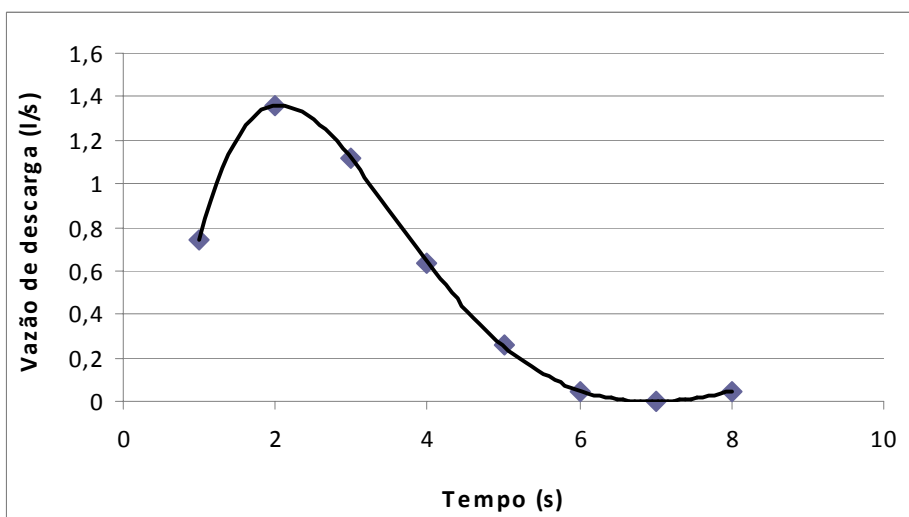


Figura 52: Hidrograma a montante da tubulação de saída da bacia sanitária

3.3 Determinação da curva chave a jusante da tubulação de saída da bacia sanitária

Para a obtenção do hidrograma a jusante do tubo de saída do sifão-trompa, segue-se a formulação de Souza [67], a partir da Figura 53, determina-se o valor da área molhada através da equação 96, abaixo:

$$A = \frac{D^2}{4} [\beta - \text{sen}(\beta)] \quad \dots \text{ (Equação 96)}$$

Para a determinação da largura de topo do escoamento através da equação 97, ou seja:

$$B = D \text{sen}(\beta) \quad \dots \text{ (Equação 97)}$$

A altura d'água pode ser determinada através da equação 98, abaixo descrita:

$$Y = \frac{D}{2} [1 - \cos(\beta)] \quad \dots \text{ (Equação 98)}$$

Partindo-se de borda livre da parte horizontal do ramal de descarga para a parte vertical do tubo de queda, tem-se Número de Froude = 1, ou seja,

$$\frac{Q^2 B}{g A^3} = 1 \quad \dots \text{ (Equação 99)}$$

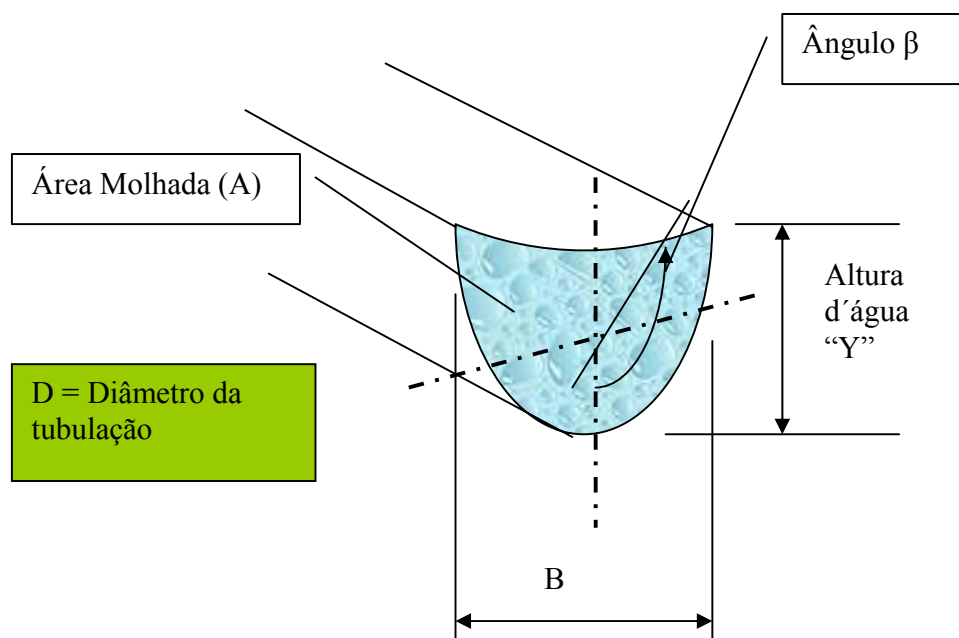


Figura 53: Determinação dos parâmetros da curva chave a jusante do sifão trompa

Modificando-se a Equação 99, para isolar a vazão “Q”, tem-se:

$$Q = \left(\frac{gA^3}{B} \right)^{1/2} \quad \dots(\text{Equação 100})$$

Re-escrevendo a Equação 100 em função da área molhada e da largura de topo do escoamento, tem-se:

$$Q = \left[\frac{gD^6 \left(\beta - \frac{\text{sen}(2\beta)}{2} \right)^3}{4^3 (D \text{sen} \beta)} \right]^{1/2} \quad \dots (\text{Equação 101})$$

Re-arranjando os termos para separar os que são função do ângulo “β” definido na Figura 51, tem-se:

$$Q = \left[\frac{\sqrt{gD^5}}{8} \right] \frac{\left(\beta - \frac{\text{sen}(2\beta)}{2} \right)^{3/2}}{(\text{sen} \beta)^{1/2}} \quad \dots (\text{Equação 102})$$

Chamando-se de $F(\beta)$ a parcela que depende do ângulo “β”, tem-se:

$$F(\beta) = \frac{\left(\beta - \frac{\text{sen}(2\beta)}{2} \right)^{3/2}}{(\text{sen} \beta)^{1/2}} \quad \dots(\text{Equação 103})$$

Voltando-se à equação 102, obtém-se:

$$Q = \left[\frac{\sqrt{gD^5}}{8} \right] F(\beta) \quad \dots(\text{Equação 104})$$

Ou, re-escrevendo a equação acima em termos da altura d’água e do diâmetro da tubulação, tem-se:

$$Q = \left[\frac{\sqrt{gD^5}}{8} \right] F\left(\frac{Y}{D}\right) \quad \dots(\text{Equação 105})$$

Chegando-se, através da equação 105 à curva-chave a jusante, nas alturas críticas, ou seja:

$$Q = Q(Y)$$

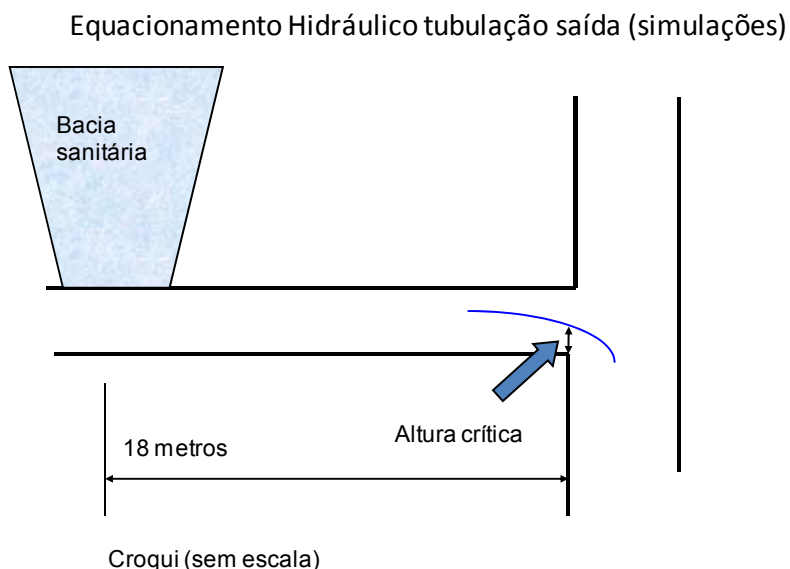


Figura 54: Topologia das simulações nos ramais de descarga

3.4 Determinação da tensão de cisalhamento mínima

Através dos equacionamentos de Souza descritos anteriormente, pode-se determinar a Tensão de Cisalhamento[22]⁴ mínima na seção “12 metros”, com dados obtidos pela simulação feita por Porto & Simões⁵, através de correspondência eletrônica, com base na Figura 54.

⁴ Preferiu-se o termo “Tensão de Cisalhamento” a “Tensão Trativa”, conforme citado em algumas bibliografias, por entender que o primeiro termo é mais amplo e difundido na Engenharia.

⁵ Para simulação da passagem da onda de cheia com as Equações de Saint-Venant, os pesquisadores citados empregaram um esquema explícito composto por diferença finita centrada (para discretização de termos espaciais) e pelo Método de Runge-Kutta de 4ª ordem para os termos temporais. Utilizaram a Equação de resistência de Darcy-Weisbach com fator de resistência constante. Nas extremidades do trecho estudado, os termos espaciais da equação da continuidade foram aproximados por diferenças avançadas e atrasadas, a montante a e jusante, respectivamente, com erro local de truncamento da ordem de ΔX , diferente do que foi feito para os nós internos, cujo erro é da ordem de ΔX^2 .

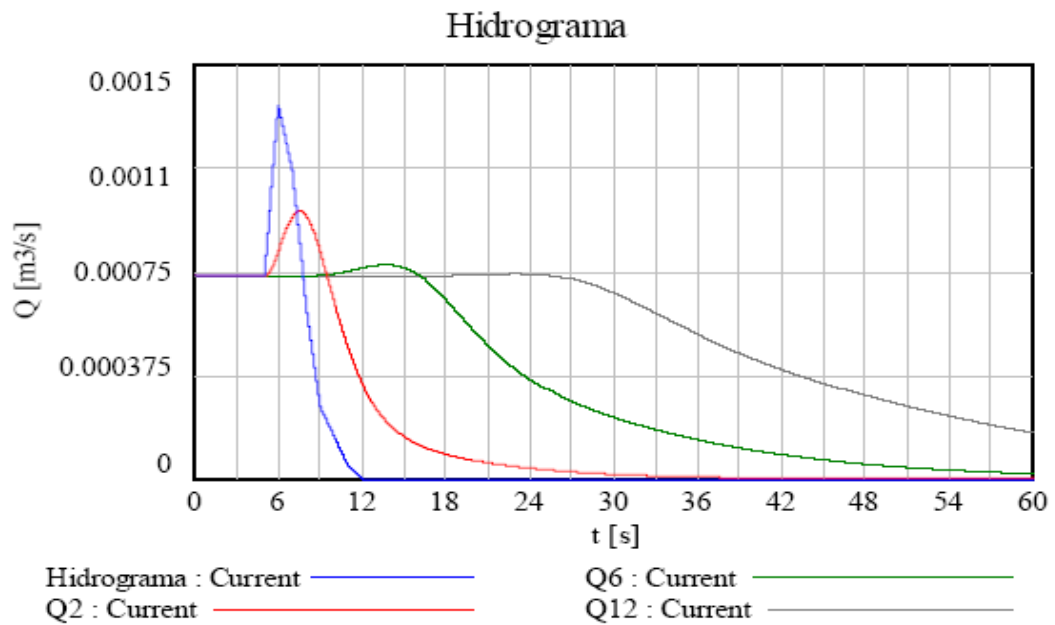


Figura 55: Hidrogramas em diferentes posições ao longo da tubulação fornecidos por Porto & Simões, através das informações do autor deste trabalho

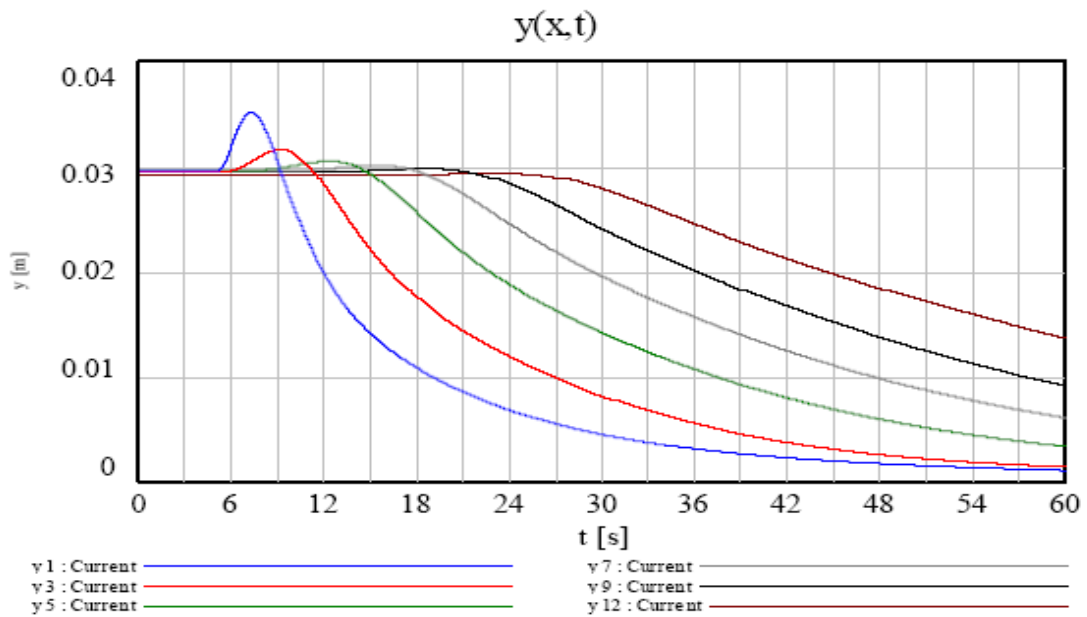


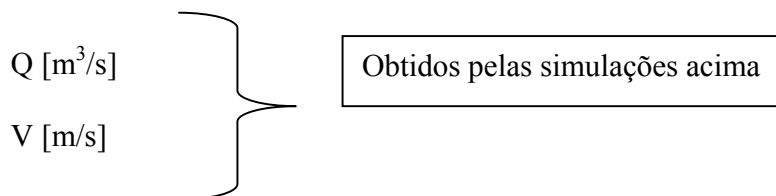
Figura 56: Curvas chaves ao longo da tubulação fornecidas por Porto & Simões, através das informações do autor deste trabalho

Através de Quantidade de Movimento aplicado ao escoamento em questão, pode-se concluir que:

$$F_{arraste} = \rho Qv = \frac{\rho Q^2}{A} \quad \dots \text{ (Equação 106)}$$

Sendo:

ρ = massa específica do fluido = 998,3 kg/m³ (conforme definido anteriormente)



$$Q_{min} = Q_{12} = 2,81 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 / \text{s}$$

Através da equação 98, obtém-se o valor do ângulo correspondente à altura na seção de 12 metros e da área molhada nesta seção, ou seja:

$$y_{12} = 0,013\text{m} \Rightarrow \cos \beta = 1 - \frac{2Y}{D} \Rightarrow \beta \cong 49,21^\circ (0,86\text{rad})$$

$$A_{12} = \frac{D^2}{4} [\beta - \text{sen}(\beta)] \Leftrightarrow A_{12} = \frac{0,075^2}{4} [0,86 - \text{sen}(0,86)] \Rightarrow A_{12} = 1,45 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

A partir dos valores obtidos acima e da equação 106 pode-se obter a força de arraste no escoamento nesta seção crítica, ou seja:

$$F_{arraste, min} = F_{12} = \frac{998,3(2,81 \cdot 10^{-4})^2}{1,45 \cdot 10^{-4}} \Rightarrow F_{arraste, min} = 0,54 \text{ kg} \cdot \text{m} / \text{s}^2 = 0,54 \text{ N}$$

Com os dados já determinados, conhece-se o valor da área transversal, ou seja:

$$A_{perim, 12} = 1x(2\beta D) = (2)(0,86)(0,075) \Rightarrow A_{perim, 12} = 0,129 \text{ m}^2$$

Calculando-se a Tensão de Cisalhamento de forma unitária:

$$\tau_{min} = \frac{F_{arraste, min}}{A_{perim, 12}} = \frac{0,54}{0,129} \Rightarrow \tau_{min} = 4,19 \text{ Pa}$$

De acordo com Alves [22], a tensão de Cisalhamento mínima para não haver depósito de resíduos é de 1Pa; portanto, no caso em questão, na seção 12, este valor é superado.

3.5 Determinação da tensão de cisalhamento máxima

Da mesma forma, pode-se determinar a Tensão de Cisalhamento Máxima, utilizando-se a formulação anterior, com os dados obtidos na altura máxima:

$$Q_{m\acute{a}x} = Q_2 = 1,3 \times 10^{-3} \text{ m}^3 / \text{s}$$

$$y_2 = 0,03318 \text{ m} \Rightarrow \cos \beta = 1 - \frac{2Y}{D} \Rightarrow \beta \cong 83,38^\circ (1,46 \text{ rad})$$

$$A_{12} = \frac{D^2}{4} [\beta - \text{sen}(\beta)] \Leftrightarrow A_{12} = \frac{0,075^2}{4} [1,46 - \text{sen}(1,46)] \Rightarrow A_{12} = 6,56 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$F_{\text{arraste } \text{m}\acute{a}x} = F_{12} = \frac{998,3(1,3 \cdot 10^{-3})^2}{6,56 \cdot 10^{-4}} \Rightarrow F_{\text{arraste } \text{m}\acute{a}x} = 2,57 \text{ kg.m} / \text{s}^2 = 2,57 \text{ N}$$

Também calculando-se a Tensão de Cisalhamento de forma unitária (comprimento = 1 metro):

$$A_{\text{perim},12} = 1x(2\beta D) = (2)(1,46)(0,075) \Rightarrow A_{\text{perim},12} = 0,219 \text{ m}^2$$

$$\tau_{\text{m}\acute{a}x} = \frac{F_{\text{arraste},\text{m}\acute{a}x}}{A_{\text{perim},12}} = \frac{2,57}{0,129} \Rightarrow \tau_{\text{m}\acute{a}x} = 19,94 \text{ Pa}$$

3.6 Estimativa do consumo de água

A partir da Tabela 9 pode-se estimar o volume consumido, ajustando-se os valores obtidos por parábola do 2º grau, utilizando o Método dos Mínimos Quadrados, através da Equação 107 e da Equação 108:

$$v = \int_1^T Q(t) dt \quad \dots(\text{Equação 107})$$

Podendo a função Vazão x tempo ser expressa pelos coeficientes abaixo descritos:

$$Q(t) = a_1 + a_2 t + a_3 t^2 \quad \dots (\text{Equação 108})$$

Com os valores de a_1 , a_2 e a_3 , obtidos pela equação abaixo, sendo $m = 7$ neste caso:

$$\begin{bmatrix} m \dots \sum_{k=1}^m t_k \dots \sum_{k=1}^m (t_k)^2 \\ \sum_{k=1}^m t_k \sum_{k=1}^m (t_k)^2 \sum_{k=1}^m (t_k)^3 \\ \sum_{k=1}^m (t_k)^2 \sum_{k=1}^m (t_k)^3 \sum_{k=1}^m (t_k)^4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{k=1}^m (Q_k) \\ \sum_{k=1}^m (Q_k t_k) \\ \sum_{k=1}^m Q_k (t_k)^2 \end{bmatrix} \quad \dots \text{(Equação 109)}$$

Calculando-se as parcelas acima, para o modelo em questão:

$$\sum_{k=1}^7 t_k = 0 + 1 + 2 + 3 + 4 + 5 + 6 = 21$$

$$\sum_{k=1}^7 (t_k)^2 = 0^2 + 1^2 + 2^2 + 3^2 + 4^2 + 5^2 + 6^2 = 91$$

$$\sum_{k=1}^7 (t_k)^3 = 0^3 + 1^3 + 2^3 + 3^3 + 4^3 + 5^3 + 6^3 = 441$$

$$\sum_{k=1}^7 (t_k)^4 = 0^4 + 1^4 + 2^4 + 3^4 + 4^4 + 5^4 + 6^4 = 2275$$

$$\sum_{k=1}^7 Q_k = 0,77 + 1,41 + 1,16 + 0,66 + 0,27 + 0,05 + 0,00 = 4,32$$

$$\sum_{k=1}^7 (Q_k t_k) = 0,77x0 + 1,41x1 + 1,16x2 + 0,66x3 + 0,27x4 + 0,05x5 + 0,00x6 = 7,04$$

$$\sum_{k=1}^7 Q_k (t_k)^2 = 0,77x0^2 + 1,41x1^2 + 1,16x2^2 + 0,66x3^2 + 0,27x4^2 + 0,05x5^2 + 0,00x6^2 = 17,56$$

Substituindo-se os valores acima na Equação 109, tem-se:

$$\begin{bmatrix} 7 & \dots & 21 & \dots & 91 \\ 21 & \dots & 91 & \dots & 441 \\ 91 & \dots & 441 & \dots & 2275 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4,32 \\ 7,04 \\ 17,56 \end{bmatrix}$$

Portanto:

$$\begin{bmatrix} a_1 = 1,068 \\ a_2 = 0,0086 \\ a_3 = -0,0367 \end{bmatrix}$$

Ou seja,

$$Q(t) = 1,068 + 0,0086t - 0,0367t^2$$

Fazendo-se a integral da função vazão em função do tempo, obtém-se o volume procurado, ou seja:

$$v = \int_1^7 Q(t) dt = \int_0^6 (1,068 + 0,0086t - 0,0367t^2) = \left[1,068t + \frac{0,0086t^2}{2} - \frac{0,0367t^3}{3} \right]_0^6 \Rightarrow v \cong 3,92 \text{ litros}$$

De outra forma, pode-se fazer:

$$m = \rho Vol$$

Substituindo-se os valores:

$$m = 1.000(0,64 - 0,37)0,01439 \Rightarrow m = 3,86 \text{ kg} (= 3,86 \text{ litros})$$

Obtendo-se, portanto, uma boa aproximação entre o valor obtido por integração da função de 2º grau ajustada por mínimos quadrados e a leitura das variações do nível máximo e mínimo do reservatório, utilizando a área transversal do RD obtido experimentalmente.

Através da metodologia adotada anteriormente, utiliza-se o Modelo de Mendes, conforme Figura 21, com fecho hídrico na bacia sanitária (não existente na Figura 49), obtém-se os valores da Tabela 9, neste caso denominada “Topologia 2”.



Figura 57: Vista lateral da Topologia 2



Figura 58: Vista Frontal da Topologia 2

Tabela 10: Variação do reservatório em função do tempo (Topologia 2)

Tempo (s)	H (diferença de nível) [cm]	Nível Reservatório (cm)
0	0,0	43,0
1	6,0	37,0
2	9,0	34,0
3	11,0	32,0
4	12,5	30,5
5	13,5	29,5
6	14,0	29,0
7	14,5	28,5
8	14,5	28,5
9	15,0	28,0
10	15,0	28,0
11	15,2	27,8
12	15,4	27,6
13	15,4	27,6
14	15,6	27,4
15	15,6	27,4
16	15,6	27,4
17	15,7	27,3
18	15,7	27,3

Tabela 11 - continuação: Variação do reservatório em função do tempo (Topologia 2)

19	15,8	27,2
20	15,9	27,1
21	15,9	27,1
22	15,9	27,1
23	15,9	27,1
24	15,9	27,1
25	15,9	27,1
26	16,0	27,0
27	16,0	27,0
28	16,0	27,0
29	16,0	27,0
30	16,0	27,0
31	16,0	27,0

A partir dos valores acima, obtém-se a Figura 59.

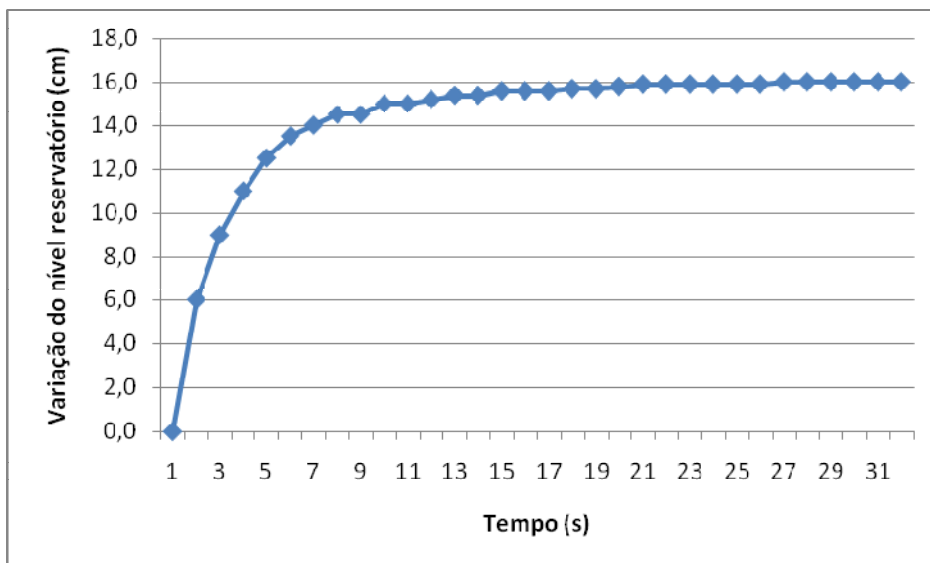


Figura 59: Variação do reservatório de descarga (Topologia 2)

Da mesma forma que a anterior, obtém-se o hidrograma da Topologia 2:

Tabela 12: Hidrograma da Topologia 2

Tempo (s)	Dh/dt	L/s (multiplicado por 0,14286)
0	8,54	1,27
1	4,04	0,60
2	2,29	0,34
3	1,71	0,25
4	1,25	0,19
5	0,71	0,11
6	0,50	0,07
7	0,21	0,03
8	0,25	0,04
9	0,28	0,04
10	0,06	0,01
11	0,23	0,03
12	0,08	0,01
13	0,10	0,01
14	0,12	0,02
15	-0,02	0,00
16	0,06	0,01
17	0,05	0,01
18	0,04	0,01
19	0,12	0,02
20	0,05	0,01
21	-0,01	0,00
22	0,00	0,00
23	0,00	0,00
24	-0,01	0,00
25	0,06	0,01
26	0,06	0,01
27	-0,01	0,00
28	0,00	0,00
29	0,00	0,00
30	0,00	0,00
31	0,00	0,00

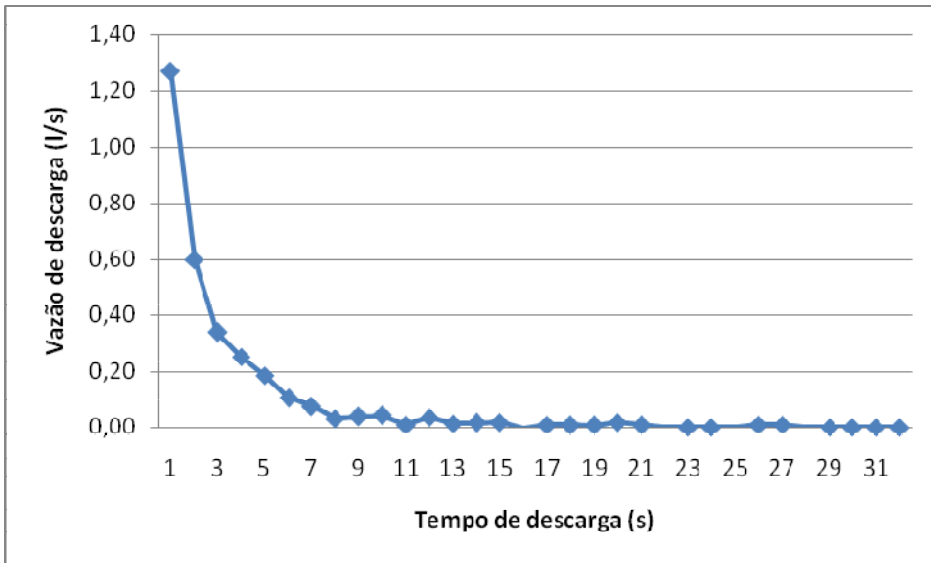


Figura 60: Hidrograma da Topologia 2

Utilizando-se das mesmas simulações anteriores, tem-se as Figuras 61 e 61, a seguir.

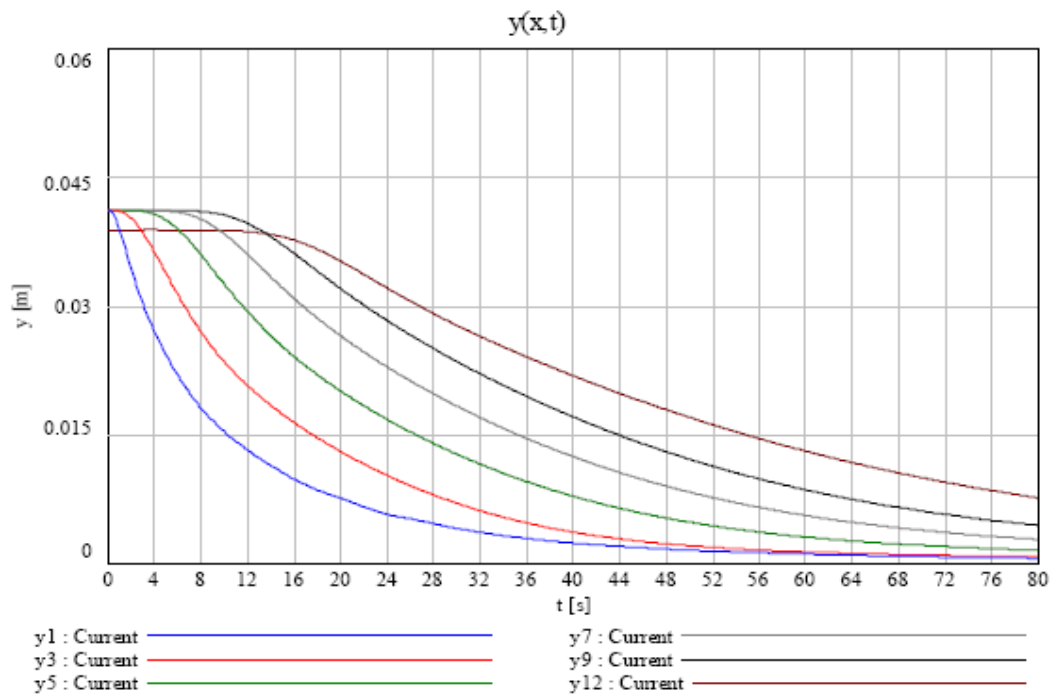


Figura 61: Curvas chaves da Topologia 2

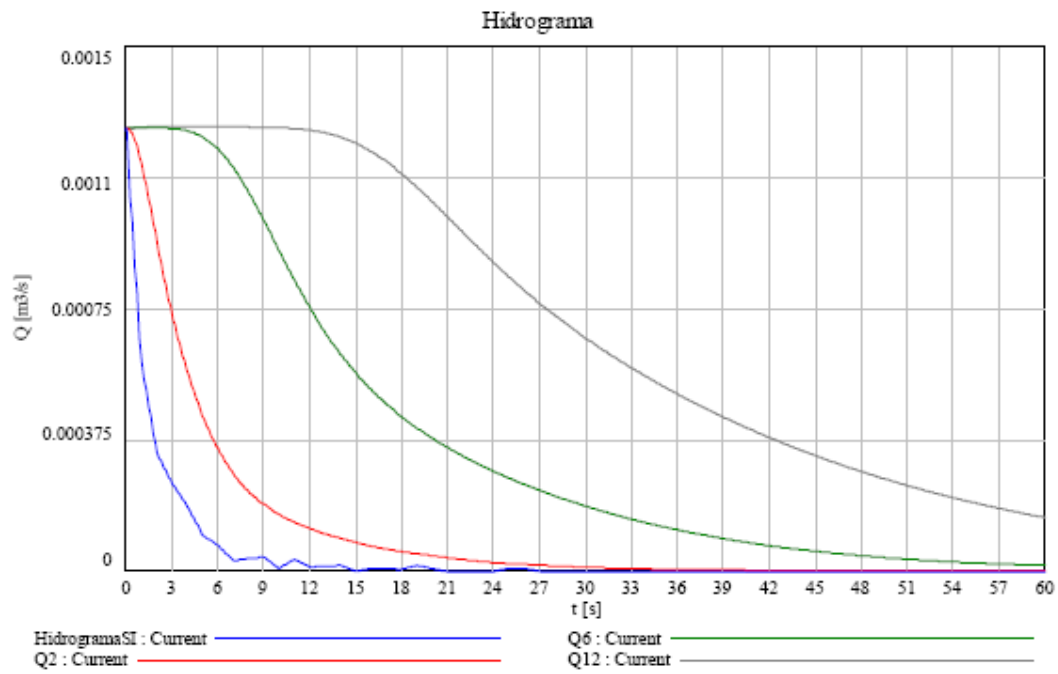


Figura 62: Hidrograma da Topologia 2

Seguindo-se a metodologia e formulações já desenvolvidas, obtém-se, para a Topologia 2:

- **Tensão Mínima Cisalhamento: 6,91 Pa**
- **Tensão Máxima Cisalhamento: 7,74 Pa**
- **Volume consumido (Mínimos quadrados – polinômio 2º grau): 3,52 litros**

4 Conclusões e Recomendações

4.1 Conclusões

O estudo em questão aliou as principais exigências dos usuários de bacias sanitárias, no modelo estudado, com o equacionamento proporcionado pela Engenharia, tendo, assim, uma visão mais ampla do sistema.

Sob o olhar do usuário, este estudo concluiu que:

- os principais modelos de bacias sanitárias utilizadas em outros países tem, em geral, compatibilidade das principais dimensões com os modelos nacionais;
- pode ser estimada a altura da bacia sanitária de modo a evitar que respingos resultantes da queda de fezes durante o ato de defecar possam atingir o usuário;
- com os dados obtidos até o momento é possível uma economia de água no uso do sistema, com um modelo que utiliza aproximadamente 4 litros;
- devida à economia citada no item anterior, também se pode reduzir os custos com tratamento de esgotos da cidade onde os modelos seriam instalados;
- há uma nítida facilidade, no modelo estudado, na instalação do sifão-trompa tanto na posição horizontal, quanto na posição vertical, evitando o uso de conexões adicionais;
- o modelo em questão possui compatibilização da utilização com as caixas de descarga usuais.

Sob o olhar da Engenharia Hidráulica, este estudo concluiu que:

- a entrada periférica na bacia sanitária, no modelo em questão, se tornou desprezível, se adotada no lado direito ou esquerdo, confirmando os estudos de Shapiro.
- é possível um método que, a partir da variação do nível de um reservatório transparente, graduado, em função do tempo, pode-se determinar importantes informações hidráulicas ou seja: força de arraste nos sólidos e a tensão de cisalhamento e a possibilidade, ou não, de acúmulo de resíduos na tubulação.
- Sendo a área do hidrograma representado por $Q(t)$, para o mesmo volume utilizado em duas ou mais bacias sanitárias, uma diminuição de $X\%$ no tempo de descarga, representa um aumento de $1/X$ no valor da vazão máxima (aproximando-se o gráfico por um triângulo) e um aumento de $(1/X)^2$ na força de arraste.
- A geometria do sifão-trompa favorece o escoamento, confirmado através do equacionamento das perdas de cargas, onde obteve-se para um tubo liso de PVC um valor pequeno ($\approx 3,6$ mm) e para um tubo corrugado, não usual neste tipo de instalação, 14,5mm. A perda relativa ao tubo de PVC pode ser desprezada, em relação às perdas de cargas usuais em bacias sanitárias comerciais, que possuem um trajeto tortuoso.

- Observou-se, na parte experimental, que houve rotacionalidade no escoamento, auxiliando que os dejetos se distanciem das bordas da tubulação, diminuindo o efeito do atrito, além de auxiliar a desintegração das mesmas, também auxiliando o escoamento.

4.2 Recomendações

Uma interação com a pesquisa da Área Médica é importante para a compreensão de parâmetros para as fezes humanas, visando um olhar hidráulico da bacia sanitária e, conseqüentemente, um maior conforto ao usuário.

Estudos futuros visando um maior detalhamento do efeito “Splash” com objetos simulando as fezes humanas para melhor compreensão deste fenômeno.

Aprofundamento teórico-experimental para tubulações de saída de 75mm para o tipo de bacia sanitária descrito neste trabalho, com trabalhos de campo em situações reais.

Sugestão de ensaios, em Normas Brasileiras, determinando-se o hidrograma de saída da bacia sanitária como complemento à especificação do volume de descarga mínimo.

Estudos simulando e equacionando jatos provenientes de urinas dos públicos masculino e feminino, analisando-se quanto ao efeito Splash e possíveis respingos na borda da bacia sanitária.

Desenvolvimento do estudo hidráulico do reservatório de nível constante citado na Dissertação de Mendes.

5 Bibliografia

Consulta em sites

- [1]. **Estação Ciência. Estação Ciência** – foto tirada em 10/01/08
- [2]. Dados São Paulo disponível em www.cidadedesapaulo.com.br/dados - acessado em 07/07/2008
- [3]. PBQP-H – Programa Brasileiro de Qualidade e Produtividade no Habitat disponível em www.cidades.gov.br/pbqp-h - acessado em 06/01/2008
- [4]. Clearlite disponível em . www.clearlite.co.nz – acessado em 07/01/08
- [5]. CWCC – California Urban Water Conservation Council disponível em . www.cuwcc.org/maptesting.lasso - acessado em 07/01/2008
- [6]. Jets disponível em . WWW.JETS.NO – acessado em 26/08/2008
- [7]. Plumbing Suplly disponível em . WWW.PLUMBINGSUPPLY.COM – acessado em 09/03/2007
- [8]. Plumbing World disponível em . WWW.PLUMBINGWORLD.COM – acessado em 07/09/2008
- [9]. Proacqua disponível em . WWW.PROACQUA.ORG.BR – acessado em 28/06/2008
- [10]. Roca disponível em . WWW.ROCA.PL – acessado em 22/01/2007
- [11]. Museu do Toilet disponível em . WWW.SULABHTOILETMUSEUM.ORG – acessado em 07/09/2008
- [12]. Totousa disponível em . WWW.TOTOUSA.COM – acessado em 07/01/2008
- [13]. Kohler disponível em . WWW.KOHLER.COM – acessado em 07/01/2008
- [14]. Victorian Crapper disponível em . WWW.VICTORIANCRAPPER.COM – acessado em 07/09/2008
- [15]. Zurn disponível em . WWW.ZURN.COM – acessado em 07/01/2008

- [16]. Descarga de ar é segredo de banheiro espacial. Disponível em <http://noticias.terra.com.br/ciencia.html> - acessado em 19/05/2007

Referências bibliográficas

- [17]. Encarte Construção. Sistema causa economia de água. Jornal O Estado de São Paulo — 15/07/2007
- [18]. Encarte Construção. Hidráulica avança com tecnologia. Jornal O Estado de São Paulo — 09/03/2008
- [19]. ACKOFF, R.L. **Redesigning the future**. John Wiley & Sons, New York, 1974
- [20]. ALKSCHBIRS, M. I. Estudo do impacto de gotas usando redutores de atrito hidrodinâmico. 1999. 98p .Dissertação (Mestrado) apresentada à UNICAMP - Universidade de Campinas. Campinas. 1999
- [21]. ALKSCHBIRS, M. I. Estudo do efeito da redução de atrito hidrodinâmico em soluções poliméricas nas estruturas produzidas pelo impacto de gotas. 2004 .185p Tese (Doutorado) apresentado à UNICAMP – Universidade de Campinas. Campinas, 2004
- [22]. ALVES, WOLNEY. Modelling of Wave Generation in Sewer system by Intermittent Discharge devices using the Saint-Venant and Boussinesq Equation. Thesis submitted to Heriot-Watt University for the degree of Doctor of Philosophy. 1996. 315p.
- [23]. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15099:2004**. Aparelhos sanitários de material cerâmico – Dimensões padronizadas –. Rio de Janeiro, Dez 2007
- [24]. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15097:2004**. Aparelhos sanitários de material cerâmico – Requisitos e Métodos de Ensaio –. Rio de Janeiro, Dez 2007
- [25]. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto 02:136.01-001/1**. Edifícios Habitacionais de até 5 pavimentos – Desempenho Parte 1: Requisitos Gerais –Rio de Janeiro, Abr 2007.
- [26]. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto 02:136.01-001/6**. Edifícios Habitacionais de até 5 pavimentos – Desempenho Parte 6: Sistemas Hidrossanitários –Rio de Janeiro, Abr 2007.

- [27]. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8160:1999** Sistemas prediais de esgoto sanitário projeto e execução . Rio de Janeiro, set 1999
- [28]. BERTALANFFY, Ludwig von. **Teoria Geral dos Sistemas**; Editora Vozes, 1975
- [29]. BIZOTTO, V. C. Estudos da redução do atrito hidrodinâmico de soluções de polieletrólitos através de imagens de impacto de gotas. 2004. 112p. Dissertação (Mestrado) apresentada à UNICAMP - Universidade de Campinas. Campinas,
- [30]. CHENG,C.L., HE, K.C & LIN, C.L. Empirical study on terminal water velocity of drainage stack. In: SIMPOSIO INTERNACIONAL CIB W62. páginas 491 a 505.
- [31]. CHENY,J. M. & WALTERS, K. Rheological influences on the splashing experiment. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 86 (1999) – p. 185-210
- [32]. DEMIDOVICH, B. P. & MARON, ISSAC – Computational Mathematics – Editora Mir, 1987. 688p
- [33]. FERNANDES, V. M. C. – Formulação das condições limites para utilização de ventilação primária e secundária nos sistemas prediais de esgotos sanitários de edifícios residenciais e de escritórios.2002. 508p – Tese (Doutorado) apresentada à EPUSP – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo,
- [34]. FERREIRA, AURÉLIO BUARQUE DE HOLANDA. Minidicionário da Língua Portuguesa. 3ª edição. Editora Nova Fronteira
- [35]. FOX, ROBERT W. & MCDONALD, ALAN T. Introdução à Mecânica dos Fluidos; LTC Editores - 1998
- [36]. GONÇALVES, ORESTES. Avaliação do desempenho de novas tecnologias de sistemas hidráulicos prediais - Revista Hydro – fevereiro 2008
- [37]. GONÇALVES, ORESTES. in Seminário: “Conservação, Uso Múltiplo e Reuso de Água em Saneamento Básico” - Painel 1 – Mesa 2 – “Conservação e Reuso de Água nas Construções Sustentáveis”– 28 de maio de 2008

- [38]. GONÇALVES, ORESTES. TAKAOKA, MARCELO & JOHN, VANDERLEY – Sustentabilidade: opção de mercado ou imposição legal? - Revista Construção Mercado – abril 2008
- [39]. GRAÇA, M.E.A & GONÇALVES, O.M. Desempenho de Sistemas Sanitários Prediais: Conceitos Fundamentais, São Paulo. EPUSP. / Notas de aula da disciplina Qualidade e Inovações dos Sistemas Prediais, 2007
- [40]. GRAÇA, M. E. A. da – Formulação de modelo para a avaliação das condições determinantes da necessidade de ventilação secundária em sistemas de esgoto sanitário. 1985.357p - Tese (Doutorado) apresentada à EPUSP – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo
- [41]. GRIMM, ALICE MARLENE – Notas de aula do curso de Meteorologia – <http://fisica.UFPR.br/grimm/aposmeteo/cap7> - acesso em 07/07/2008
- [42]. ILHA, MARINA SANGOI DE OLIVEIRA. Evolução do Conhecimento na Área dos Sistemas Prediais Hidráulicos e Aplicações Práticas - Revista Hydro – agosto 2007
- [43]. ILHA, MARINA SANGOI DE OLIVEIRA., GOLÇALVES, ORESTES MARRACINI & OLIVEIRA JÚNIOR, OSVALDO BARBOSA. Avaliação do desempenho de bacias sanitárias de volume de descarga reduzido quanto à remoção e transporte de sólidos - ANTAC – Ambiente Construído, Porto Alegre, v.2, n.4, p. 47-61 – out/dez 2002
- [44]. HARLOW, FRANCIS H. and SHANNON, JOHN P. The splash of the liquid drop. Journal of Applied Physics – Volume 38 – number 10 – September 1967
- [45]. HSIAO, LICHTERAND QUITERO. The critical Weber number for vortex and jet formation for drops imping on a liquid pool. Phys Fluid, vol. 31, n° 12, December 1988
- [46]. ILHA, MARINA SANGOI DE OLIVEIRA. Evolução do conhecimento na área dos sistemas prediais hidráulicos e aplicações práticas - Revista Hydro – agosto 2007
- [47]. LANDI, FRANCISCO ROMEU. A evolução histórica das instalações prediais. Escola Politécnica da USP – BT PCC 15/87. 68p.
- [48]. MANZELLO, SAMUEL L. and YANG, JIAN C. The influence of liquid pool temperature on the critical impact Weber number for splashing - Phys Fluid, vol. 15, n° 1, January 2003

- [49]. MARCELLINI, LAURA & FERREIRA, ARMANDO TRAINI. Contribuições da abordagem de desempenho de sistemas ao desenvolvimento de Novos Produtos / Materiais Estudo de caso: Bacia Sanitária – trabalho apresentado na Disciplina: Qualidade e Inovações dos Sistemas Prediais - EPUSP – junho/ 2007
- [50]. MENDES, J. B. Bacia sanitária com descarga mínima. Dissertação apresentada à EPUSP – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2000. 93p
- [51]. MONTENEGRO, M.S H. F. Desempenho de desconectores e dimensionamento de instalações prediais de esgoto. Dissertação apresentada à EPUSP - Escola Politécnica da Universidade de São, 1985.151p.
- [52]. MONTENEGRO, MARCOS HELANO FERNANDES. Economia de água e desempenho de aparelhos sanitários. Artigo 006 – Tecnologia das Edificações – Revista Construção – Editora Pini
- [53]. NEKRASOV, B. – Hidráulica – Editora Mir, 1970. 279p
- [54]. NETO, AZEVEDO – Manual de Hidráulica – volume 1 – 1991. 335p
- [55]. NIGEN,S. & WALTERS, K. On the two-dimensional splashing experiment for Newtonian and slightly elastic liquids. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 97 (2001) – págs 233-250
- [56]. OKAMURA, EDGAR KOJI. Economia de água em bacias sanitárias. Revista Ciência do Ambiente on-line. Fevereiro, 2006 – volume 2 – Número 1.
- [57]. OLIVEIRA JÚNIOR, O. B. DE . Avaliação do desempenho funcional de bacias sanitárias de volume de descarga reduzido com relação à remoção e transporte de sólidos. Dissertação apresentada à UNICAMP - Universidade de Campinas. Campinas, 2002.281p
- [58]. ONGOREN, A & MEIER, B. A numerical approach to investigate solid transport characteristics in waste water drainage systems. In: SIMPOSIO INTERNATIONAL CIB W62 – pág 455. Proceedings of the CIB W62 International Symposium
- [59]. PLUMBING INDUSTRY COMMISSION. Testing Times “down under” in WPR – World Plumbing Review – Issue 1 – march 2007

- [60]. PORTO, RODRIGO DE MELO – Hidráulica Básica – Projeto REENGE – 1998 – 540p
- [61]. ROCHA, A. L. Estudo para identificação e avaliação de parâmetros de projetos de bacias sanitárias de ação sifônica tendo em vista a redução do consumo de água. Dissertação (Mestrado) apresentada à EPUSP – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo . São Paulo, 1990.178p
- [62]. ROMA, WOODROW NELSON LOPES. Fenômenos de Transporte para Engenharia – Rima Editora – 2003
- [63]. SANTOS, D. C. DOS – Contribuições para a Estruturação de Modelo Aberto para o Dimensionamento Otimizado dos Sistemas Prediais de Esgotos Sanitários – Tese (Doutorado) apresentada à EPUSP – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1998. 230p
- [64]. SCHMIDT, W. Caracterização e Formulação de parâmetros para avaliação de mictórios – o caso do mictório sem água. Dissertação (Mestrado) apresentada à EPUSP – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2003.247p.
- [65]. SHAPIRO, ACSHER H. – Bath-tub Vortex in Nature – 15/12/1962 – vol. 196 – p. 1080-1081
- [66]. SOARES, P. F. Válvula cônica convergente com vórtice axial. Dissertação (Mestrado) apresentada à EPUSP – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1990.123p
- [67]. SOUZA, PODALYRO AMARAL in SOBRINHO, PEDRO ALÉM. Coleta e Transporte de Esgoto sanitário, 2000. 548p.
- [68]. STROBEL VERLAG apud Ilha, Marina S. de Oliveira. Vantagens dos sistemas de descarga eletrônicas – revista Hydro – junho 2007 – p. 22 a 27
- [69]. SWALFFIELD, J.A. E McDOUGALL, J.A. adaptado por Ilha, Marina S. de Oliveira. Transporte de sólidos deformáveis em sistemas de esgoto com volume de descarga reduzidas – revista Hydro – abril 2008 – p. 22 a 33
- [70]. THE L. L. MOTT IRON WORKS. Victorian Plumbing Fixtures. 1988. 277p.
- [71]. VIEIRA, RUI CARLOS DE CAMARGO – Atlas de Mecânica dos Fluidos – Estática – Ed. Edgard Blucher / EDUSP – 1971. 133p

- [72]. UJJAMHAN, E.J.S. Water conservation WC design: a study of the design parameters affecting WC performance. Thesis submitted to Brunel University for the degree of Doctor of Philosophy. Uxbridge, 1981 -515p.
- [73]. WENDT, D. Uso e dimensionamento de produtos: o caso do vaso sanitário. Dissertação (Mestrado) apresentada à Universidade Federal de Santa Catarina. São Paulo, 2001. 99p.
- [74]. WORTHINGTON, A.M. – A study of Splashes – Ed. Longman – London – 1908.