



**João David Moreira
da Cunha Gonçalves**

**Estudo dos Efeitos da Colmatação Parcial do Ralo
de Sistemas Sifónicos de Drenagem de Coberturas**



**João David Moreira
da Cunha Gonçalves**

**Estudo dos Efeitos da Colmatação Parcial do Ralo
de Sistemas Sifónicos de Drenagem de Coberturas**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, realizado sob a orientação científica da Doutora Inês Osório de Castro Meireles, Professora Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro e coorientação do Doutor Armando Baptista da Silva Afonso, Professor Catedrático Convidado (Aposentado) do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro.

o júri

presidente

Prof. Doutor Joaquim Miguel Gonçalves Macedo
Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro

Doutora Carla Andreia Pimentel Rodrigues
Direção Técnica da ANQIP – Associação Nacional para a Qualidade nas Instalações Prediais

Prof. Doutora Inês Osório de Castro Meireles
Professora Auxiliar da Universidade de Aveiro

agradecimentos

O desenvolvimento desta dissertação só foi possível devido a um conjunto de pessoas, a quem gostaria de expressar o meu agradecimento.

A todo o leque de professores que no meu percurso escolar e académico contribuíram para a minha formação e aprendizagem.

A toda a minha família que me acompanhou neste percurso. Em especial aos meus pais, que me deram todas as condições e o apoio necessário, com paciência na longa espera em alcançar este objetivo.

À Professora Doutora Inês Meireles, orientadora da dissertação, pela orientação dada, disponibilidade, constantes sugestões, incentivo e compreensão demonstrados.

Ao Professor Doutor Armando Silva Afonso, coorientador desta dissertação, pela motivação transmitida, sugestões e partilha de conhecimentos.

Não posso também deixar de agradecer toda a colaboração que me foi prestada pelo pessoal técnico do Laboratório de Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro, pela abertura demonstrada e cedência de espaço e materiais tendo em vista a realização dos ensaios experimentais desta dissertação. Nomeadamente, à Eng.^a Maria Carlos pelas sugestões e apoio sempre disponível, ao assistente operacional Sr. Vítor Rodrigues cuja montagem de todo o equipamento de segurança quero agradecer e por último ao Eng.^o Jorge Fonseca pela cedência do material indispensável à realização do registo fotográfico laboratorial.

Aos colegas e também amigos, Helder Filipe, Tiago Moura, José Carlos, André Oliveira e António de Vasconcelos, pela companhia diária, conhecimentos transmitidos, força dada e incentivo em terminar esta fase.

Ao Daniel Bastos pelo companheirismo nesta última etapa. Partilhámos muitas horas de estudo. Muitos pequenos passos dados para chegar a este dia, todos ultrapassados com sucesso. Como engenheiros que seremos, podemos dizer “empreitada concluída com sucesso”.

Por fim, quero agradecer à Rita. Por tudo o que é e pelo que ainda está para vir. Por me ter lembrado todos os dias dos meus objetivos, nos momentos de impaciência e dias de desânimo. Pela confiança e pela valorização sempre tão entusiasta do meu trabalho, além de todo o apoio incondicional que me deu. Por toda a compreensão demonstrada pela atenção que lhe subtraí.

A todos o meu obrigado.

palavras-chave

sistema sifônico; caudal; colmatção; escoamento; drenagem de águas pluviais.

resumo

Os sistemas sifônicos de drenagem de coberturas permitem, através de ralos de depressão, o escoamento de quantidades de água significativamente superiores às drenadas por sistemas convencionais de iguais dimensões. No entanto, se colmatados, os ralos perdem grande parte da sua eficiência.

Este trabalho pretende avaliar a eficiência de escoamento de um sistema de drenagem sifônica de águas pluviais em coberturas com colmatção parcial.

Os ensaios foram realizados recorrendo a uma torre hidráulica com um sistema de drenagem sifônica de águas pluviais em coberturas. Foram realizados ensaios com 80%, 100%, 120% e 140% do caudal de dimensionamento, com colmatção apenas lateral, com colmatção lateral e no topo e por último com colmatção apenas no topo.

Os resultados obtidos evidenciam que todos os caudais ensaiados seguem uma tendência de crescimento até uma percentagem de colmatção de 85% após a qual o comportamento se altera. Verificou-se como indiferente, por si só, a colmatção apenas no topo do ralo sifônico. A colmatção no topo quando associada com a colmatção lateral, mostrou diferenças notórias no desempenho do escoamento face à colmatção apenas lateral.

Por fim, comprova-se que a elevada percentagem de colmatção tem influência no regime de escoamento, chegando mesmo a anular o efeito sifônico.

keywords

siphonic drainage system; discharge; blockage; flow; roof drainage systems.

abstract

Through specially engineered roof drain baffles, siphonic roof drainage systems allow a greater water drainage compared to conventional systems of equal dimensions. However, if blocked, the drains lose much of their efficiency.

This work intends to evaluate the drainage efficiency of a siphonic roof drainage system partial blockage.

The experience was carried out in a test facility with an incorporated siphonic drain baffle. Tests were made with design flow rates of 80%, 100%, 120% and 140%, with lateral, lateral and top and top blockages.

The results show that all the flow rates tested follow a growth trend up to an 85% blockage, after which the behavior changes. The tests with the blockage only at the top of the siphonic drain baffle showed no differences on its own. Blockage at the top, when associated with lateral blockage, showed strong differences in flow performance when compared with lateral only blockage.

In conclusion, the greater the blockage, the lower the efficiency of the drainage system; the blockage percentage influences the flow and can even annul the full-bore flow and siphonic action.

ÍNDICE GERAL

1	Introdução	3
1.1	Enquadramento	3
1.2	Objetivos	4
1.3	Estrutura da dissertação	5
2	Revisão Bibliográfica	9
2.1	Introdução ao sistema sifónico	9
2.2	Composição de um sistema sifónico	10
2.2.1	Ralos	11
2.2.2	Tubagens	12
2.2.3	Sistemas de fixação	14
2.3	Funcionamento dos sistemas sifónicos	15
2.3.1	Princípio de funcionamento	15
2.3.2	Modo de funcionamento	18
2.4	Vantagens e desvantagens	20
2.5	Aplicações	21
2.6	Dimensionamento do sistema sifónico	22
2.7	Recomendações	22
2.8	Análise de estudos anteriores	24
2.8.1	Influência da entrada de ar nas tubagens	24
2.8.1.1	Ar já presente nas tubagens	25
2.8.1.2	Ar que entra pelos ralos sifónicos	25
2.8.2	Saída do ar dos sistemas sifónicos	26
2.8.3	A importância da consideração da presença de ar no dimensionamento dos sistemas sifónicos	26

2.8.4	Funcionamento em eventos extraordinários	26
2.8.4.1	Sistemas tradicionais de drenagem	27
2.8.4.2	Sistemas sifônicos de drenagem	27
2.8.5	Estudos experimentais	28
2.8.5.1	Tabela resumo dos estudos experimentais pesquisados nas fontes bibliográficas	28
2.8.5.2	Sistemas sifônicos <i>versus</i> sistemas tradicionais	29
2.8.5.3	Funcionamento hidráulico de um sistema de drenagem sifônica aplicado a um sistema de aproveitamento de águas pluviais (SAAP)	30
2.8.5.4	Efeitos da colmatação de sistemas sifônicos de drenagem	31
2.8.5.5	Sistemas de um só ralo <i>versus</i> sistemas de múltiplos ralos	35
2.8.5.6	Medição de caudais em tubagens de sistemas de drenagem sifônica com secção não totalmente cheia	37
2.8.6	Estudos numéricos	37
2.8.6.1	Método das Características	37
2.8.6.2	Método ROOFNET	37
2.8.6.3	Método MacCormack	38
2.8.6.4	Dinâmica dos Fluidos Computacional	38
3	Método Experimental	41
3.1	Instalação Experimental	41
3.1.1	Reservatório de armazenamento de água	41
3.1.2	Quadro elétrico e controlador da bomba de água	42
3.1.3	Bomba de água	43
3.1.4	Tubagem de fornecimento de água à cobertura	44
3.1.5	Caudalímetro eletromagnético e conversor de sinal	46
3.1.6	Depósito de água da cobertura	47

3.1.7	Ralo sifónico	47
3.1.8	Tubagem de drenagem de água	48
3.2	Alterações introduzidas à instalação experimental	50
3.2.1	Dispositivo de uniformização da alimentação da água	50
3.2.2	Placa de nivelamento da superfície livre de água na cobertura	51
3.3	Colmatação do ralo sifónico	52
3.3.1	Colmatação lateral	52
3.3.2	Colmatação no topo	53
3.4	Equipamento experimental	53
3.4.1	Equipamento de captação de imagem	53
3.4.2	Equipamento de medição da altura de água	55
3.5	Condições experimentais	55
3.5.1	Caudal de dimensionamento	55
3.5.2	Caudais a ensaiar	57
3.5.3	Forma da colmatação lateral do ralo sifónico	58
3.5.4	Escolha da duração de cada ensaio	60
3.5.5	Curvas de aceleração da bomba	60
3.5.6	Colmatação do ralo sifónico	60
3.5.7	Ensaio realizados	61
3.6	Metodologia experimental	62
3.7	Incerteza experimental	62
4	Resultados Experimentais	67
4.1	Ensaio com colmatação lateral e no topo	67
4.1.1	Caudal $0,8 \times Q_0$	69
4.1.2	Caudal Q_0	70
4.1.3	Caudal $1,2 \times Q_0$	73

4.1.4	Caudal $1,4 \times Q_0$	75
4.2	Ensaio com colmatação lateral	76
4.2.1	Caudal $0,8 \times Q_0$	77
4.2.2	Caudal Q_0	80
4.2.3	Caudal $1,2 \times Q_0$	83
4.2.4	Caudal $1,4 \times Q_0$	86
4.3	Ensaio com colmatação no topo	89
4.3.1	Caudal $1,2 \times Q_0$	90
4.3.2	Caudal $1,4 \times Q_0$	92
4.4	Repetibilidade dos ensaios experimentais	93
5	Análise e Discussão de Resultados	97
5.1	Análise da repetibilidade dos ensaios experimentais	97
5.1.1	Ensaio sem colmatação	97
5.1.2	Ensaio com várias percentagens de colmatação lateral	99
5.2	Caudal $0,8 \times Q_0$	101
5.3	Caudal Q_0	104
5.4	Caudal $1,2 \times Q_0$	109
5.4.1	Comparação de colmatação lateral + topo com a colmatação lateral	109
5.4.2	Comparação de colmatação no topo e sem colmatação	114
5.5	Caudal $1,4 \times Q_0$	115
5.5.1	Comparação de colmatação lateral + topo com a colmatação lateral	115
5.5.2	Comparação de colmatação no topo e sem colmatação	121
6	Considerações Finais	127
6.1	Conclusões	127
6.2	Desenvolvimentos futuros	128

Referências Bibliográficas

133

Anexo 1

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Sistema tradicional de drenagem de águas pluviais (Valsir, 2013).	9
Figura 2.2: Sistema sifónico de drenagem de águas pluviais (Valsir, 2013).	9
Figura 2.3: Ralo sifónico (retirado e adaptado de www.geberit.com a 05-01-2017).	11
Figura 2.4: Sistema de tubagens de um sistema sifónico (retirado de http://pacificpp.com a 26-10-2016).	12
Figura 2.5: Estrutura metálica de fixação de tubagens (retirado de http://www.geberit.com a 09-12-2015).	15
Figura 2.6: Teorema de Bernoulli aplicado a escoamento de fluidos com viscosidade e atrito (retirado e adaptado de www.valsir.it a 15-12-2016).	15
Figura 2.7: Efeito de Venturi na alteração da pressão do escoamento (Pereira, 2012).	17
Figura 2.8: Escoamento num ralo sifónico (adaptado de Smith (2008)).	19
Figura 2.9: Tipos de regime de escoamento na tubagem de um sistema de drenagem sifónica (adaptado de Smith (2008)).	20
Figura 2.10: Aplicação do sistema sifónico (Pereira, 2012).	22
Figura 2.11: Redução de diâmetro nas tubagens horizontais (Pereira, 2012).	23
Figura 2.12: Aumento de diâmetro nas tubagens horizontais (Pereira, 2012).	23
Figura 2.13: Sistema de drenagem sifónica usado por Silva (2014).	31
Figura 2.14: Thomas Thompson House, evidenciando o posicionamento das câmaras e dos ralos monitorizados (adaptado de Beattie <i>et al.</i> (2011)).	32
Figura 2.15: Imagens das caleiras, recolhidas entre operações de manutenção (adaptado de Beattie <i>et al.</i> (2011)).	33
Figura 2.16: Ibrox Stadium. Representação esquemática das áreas monitorizadas (adaptado de Beattie (2013)).	34
Figura 2.17: Representação esquemática do sistema sifónico testado (adaptado de Wright <i>et al.</i> (2002)).	36
Figura 3.1: Torre Hidráulica da Universidade de Aveiro.	41
Figura 3.2: Reservatório de armazenamento de água.	42
Figura 3.3: Quadro elétrico e controlador da bomba de água.	43
Figura 3.4: Bomba de água Grundfos AP12.50.11.3.	43

Figura 3.5: Altura de elevação máxima a 50 Hz da bomba de água Grundfos AP12.50.11.3 (Grundfos, 2016).	44
Figura 3.6: Tubo Geberit Mepla 63 x 4,5.	45
Figura 3.7: Esquema altimétrico da tubagem de fornecimento de água à cobertura (dimensões em metros).	46
Figura 3.8: Caudalímetro eletromagnético e conversor de sinal.	46
Figura 3.9: Depósito de água da cobertura.	47
Figura 3.10: Ralo sifónico instalado na cobertura.	47
Figura 3.11: Tubagem de plástico transparente da instalação experimental.	48
Figura 3.12: Esquema altimétrico da instalação experimental com marcação dos comprimentos de cada troço da tubagem (dimensões em metros).	49
Figura 3.13: Dispositivo de uniformização da alimentação de água na cobertura.	51
Figura 3.14: Régua de nivelamento da superfície livre de água na cobertura.	51
Figura 3.15: Poliestireno extrudido em forma de rolo (retirado de www.leroymerlin.pt a 20-10-2016).	52
Figura 3.16: Colmatação lateral do ralo sifónico.	53
Figura 3.17: Colmatação no topo do ralo sifónico.	53
Figura 3.18: Equipamento de captação de imagem.	54
Figura 3.19: <i>Software</i> de captação de imagem.	54
Figura 3.20: Fita métrica de medição das alturas de água.	55
Figura 3.21: Determinação experimental do caudal de dimensionamento do sistema sifónico.	56
Figura 3.22: Evolução temporal dos caudais ensaiados.	58
Figura 3.23: Forma da colmatação lateral do ralo sifónico (vista superior).	58
Figura 3.24: Ensaio das formas da colmatação lateral do ralo sifónico.	59
Figura 3.25: Teste de Kruskal-Wallis realizado aos valores médios das três formas de colmatação.	59
Figura 3.26: Representação esquemática das percentagens de colmatação efetuadas no ralo sifónico (vista superior).	61
Figura 4.1: Alturas de água para o caudal $0,8 \times Q_0$ com colmatação lateral e no topo.	69
Figura 4.2: Alturas de água para o caudal Q_0 com colmatação lateral e no topo.	71
Figura 4.3: Alturas de água para o caudal $1,2 \times Q_0$ com colmatação lateral e no topo.	73

Figura 4.4: Alturas de água para o caudal $1,4 \times Q_0$ com colmatação lateral e no topo.	75
Figura 4.5: Alturas de água para o caudal $0,8 \times Q_0$ com colmatação lateral.	78
Figura 4.6: Formação de bolhas de ar observadas num ensaio com caudal $0,8 \times Q_0$.	80
Figura 4.7: Alturas de água para o caudal Q_0 com colmatação lateral.	81
Figura 4.8: Vórtices visíveis no caudal Q_0 com colmatação de 95% lateral.	83
Figura 4.9: Alturas de água para o caudal $1,2 \times Q_0$ com colmatação lateral.	84
Figura 4.10: Entrada de ar na tubagem de drenagem num ensaio com caudal $1,2 \times Q_0$.	85
Figura 4.11: Vórtices visíveis no caudal $1,2 \times Q_0$ para elevadas percentagens de colmatação.	86
Figura 4.12: Alturas de água para o caudal $1,4 \times Q_0$ com colmatação lateral.	87
Figura 4.13: Entrada de ar na tubagem de drenagem num ensaio com caudal $1,4 \times Q_0$.	88
Figura 4.14: Vórtice visível no caudal $1,4 \times Q_0$ com colmatação de 95% lateral.	89
Figura 4.15: Alturas de água para o caudal $1,2 \times Q_0$ com colmatação no topo.	91
Figura 4.16: Alturas de água para o caudal $1,4 \times Q_0$ com colmatação no topo.	92
Figura 4.17: Alturas de água para os vários caudais em estudo, sem colmatação.	93
Figura 5.1: Diferenças relativas $(h-h_0)/h_0$ em leituras de água em datas distintas, para os quatro caudais em estudo sem colmatação.	98
Figura 5.2: Diferenças relativas $(h-h_0)/h_0$ em leituras da altura de água em datas distintas para o caudal $0,8 \times Q_0$ nas percentagens de 10% a 85%.	99
Figura 5.3: Diferenças relativas $(h-h_0)/h_0$ em leituras da altura de água em datas distintas para o caudal Q_0 nas percentagens de 10% a 60%.	100
Figura 5.4: Alturas de água dos ensaios efetuados para o caudal $0,8 \times Q_0$, para a colmatação de 90% a 100%.	102
Figura 5.5: Diferenças relativas $(h-h_0)/h_0$ entre as colmatações lateral + topo e lateral, para todas as percentagens desde 90% a 100% no caudal $0,8 \times Q_0$.	103
Figura 5.6: Alturas de água dos ensaios efetuados para o caudal Q_0 , para a colmatação de 70% a 100%.	105
Figura 5.7: Diferenças relativas $(h-h_0)/h_0$ entre as colmatações lateral + topo e lateral, para todas as percentagens desde 70% a 100% no caudal Q_0 .	107

Figura 5.8: Alturas de água dos ensaios efetuados para o caudal $1,2 \times Q_0$, para a colmatação de 10% e 85%.	109
Figura 5.9: Diferenças relativas $(h-h_0)/h_0$ entre as colmatações lateral + topo e lateral, para todas as percentagens de colmatação no caudal $1,2 \times Q_0$.	110
Figura 5.10: Diferenças relativas $(h-h_0)/h_0$ entre as colmatações lateral + topo e lateral, para todas as percentagens desde 10% a 85% no caudal $1,2 \times Q_0$.	111
Figura 5.11: Alturas de água dos ensaios efetuados para o caudal $1,2 \times Q_0$, para a colmatação de 90% a 100%.	112
Figura 5.12: Diferenças relativas $(h-h_0)/h_0$ entre as colmatações lateral + topo e lateral, para todas as percentagens desde 90% a 100% no caudal $1,2 \times Q_0$.	113
Figura 5.13: Diferenças relativas $(h-h_0)/h_0$ entre a colmatação no topo e sem colmatação, para o caudal $1,2 \times Q_0$.	115
Figura 5.14: Alturas de água dos ensaios efetuados para o caudal $1,4 \times Q_0$, para a colmatação de 10% e 85%.	116
Figura 5.15: Diferenças relativas $(h-h_0)/h_0$ entre as colmatações lateral + topo e lateral, para todas as percentagens de colmatação no caudal $1,4 \times Q_0$.	117
Figura 5.16: Diferenças relativas $(h-h_0)/h_0$ entre as colmatações lateral + topo e lateral, para todas as percentagens desde 10% a 85% no caudal $1,4 \times Q_0$.	118
Figura 5.17: Alturas de água dos ensaios efetuados para o caudal $1,4 \times Q_0$, para a colmatação de 90% a 100%.	119
Figura 5.18: Diferenças relativas $(h-h_0)/h_0$ entre as colmatações lateral + topo e lateral, para todas as percentagens desde 90% a 100% no caudal $1,4 \times Q_0$.	120
Figura 5.19: Diferenças relativas $(h-h_0)/h_0$ entre a colmatação no topo e sem colmatação, para o caudal $1,4 \times Q_0$.	122
Figura 5.20: Diferenças relativas h/h_0 entre a colmatação no topo e sem colmatação, para o caudal $1,2 \times Q_0$ e $1,4 \times Q_0$.	123

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1: Valores médios de parâmetros de três tipos comuns de materiais usados em tubagens de sistemas sifónicos (Silva, 2014)	13
Tabela 2.2: Tabela resumo dos vários estudos experimentais pesquisados nas fontes bibliográficas.	29
Tabela 2.3: Evolução da quantidade de detritos acumulados na caleira do Ibrox Stadium (adaptado de Beattie <i>et al.</i> (2012)).	35
Tabela 3.1: Especificações técnicas da bomba de água Grundfos AP12.50.11.3 (Grundfos, 2016).	44
Tabela 3.2: Especificações técnicas do tubo Geberit Mepla 63 x 4,5 (Geberit Tecnologia Sanitária, 2005a).	45
Tabela 3.3: Características técnicas do dimensionamento efetuado pelo fabricante para as tubagens de drenagem (Geberit Tecnologia Sanitária, 2005b).	50
Tabela 3.4: Fenómenos a observar na instalação experimental para diferentes frequências de funcionamento da bomba e caudal debitado, conforme indicado pelo fabricante (Geberit Tecnologia Sanitária, 2005b).	56
Tabela 3.5: Caudais ensaiados.	57
Tabela 4.1: Colmatações efetuadas nos ensaios com colmatação lateral e no topo.	68
Tabela 4.2: Colmatações efetuadas nos ensaios com colmatação lateral.	77
Tabela 4.3: Colmatações efetuadas nos ensaios com colmatação no topo.	90
Tabela 5.1: Diferenças relativas entre colmatação lateral + topo e colmatação lateral, para as percentagens de colmatação de 90% a 100% no caudal $0,8 \times Q_0$.	103
Tabela 5.2: Diferenças relativas entre colmatação lateral + topo e colmatação lateral, para as percentagens de colmatação de 70% a 100% no caudal Q_0 .	108
Tabela 5.3: Diferenças relativas entre colmatação lateral + topo e colmatação lateral, para as percentagens de colmatação de 90% a 100% no caudal $1,2 \times Q_0$.	113
Tabela 5.4: Diferenças relativas entre colmatação lateral + topo e colmatação lateral, para as percentagens de colmatação de 90% a 100% no caudal $1,4 \times Q_0$.	120

LISTA DE SÍMBOLOS

Latinas minúsculas

$\cos \varphi$	fator de potência
g	aceleração da gravidade [m/s^2]
h	altura [m]
h	altura de água medida numa data [cm]
h	altura de água no tanque da cobertura [cm]
h_0	altura de água medida numa segunda data [cm]
l	comprimento [m]
min	minutos
p_i	pressão relativa do ponto i [Pa]
s	segundos
v_i	velocidade na secção i [m/s]

Latinas maiúsculas

H	altura de elevação máxima a 50 Hz da bomba de água [m]
I_n	corrente nominal [A]
K	coeficiente de Manning-Strickler [$\text{m}^{1/3}/\text{s}$]
P	precipitação [mm]
P_1	potência máxima de funcionamento da bomba de água [kW]

P_2	potência mínima de funcionamento da bomba de água [kW]
Q	caudal [m^3/s]
Q_0	caudal de projeto; caudal máximo de escoamento [l/s]
S	área da secção transversal [m^2]
U	velocidade de escoamento [m/s]
V	velocidade de escoamento [m/s]
Z_i	cota do ponto i [m]

Gregas minúsculas

α	coeficiente de dilatação térmica linear
γ	peso volúmico do fluido [N/mm^3]

Gregas maiúsculas

ΔH	perda de carga [m]
ΔH_c	perda de carga contínua [m]
ΔH_l	perda de carga localizada [m]
Δl	variação de comprimento [m]
Δt	variação de temperatura [$^{\circ}\text{C}$]

SIGLAS DE ENTIDADES

ANQIP	Associação Nacional para a Qualidade nas Instalações Prediais
ASME	American Society of Mechanical Engineers
DECivil	Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro
SRDA	Siphonic Roof Drainage Association
UA	Universidade de Aveiro

ABREVIATURAS

CFD	Computational Fluid Dynamics
DR	Diário da República
EN	European Standard
L	lateral
L+T	lateral + topo
PEAD	polietileno de alta densidade
PVC	policloreto de vinil
SAAP	sistema de aproveitamento de águas pluviais
S.C.	sem colmatação

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

1 INTRODUÇÃO

A drenagem de águas pluviais é um assunto de relevo no âmbito da Engenharia Civil. Grande parte das construções está diretamente exposta aos elementos, em particular à pluviosidade. As águas da chuva precisam de ser captadas e guiadas para zonas previamente definidas. Um sistema de captação e guiamento do escoamento inexistente ou incorreto pode trazer os mais diversos efeitos adversos. À escala urbana podem ocorrer cheias, causadoras de prejuízos e perturbadores do quotidiano. À escala predial poderão ocorrer infiltrações indesejadas, desgaste prematuro dos materiais ou alteração da segurança no uso do edifício (Pereira, 2012).

Têm surgido ultimamente várias soluções de drenagem pluvial que utilizam princípios diferentes dos tradicionais, mais amplamente usados. Dado que a sua introdução foi relativamente recente à escala da Engenharia, surge a necessidade de avaliar a adequação e eficiência destas novas soluções (Pereira, 2012).

É este o principal pressuposto que serve de base à elaboração do presente estudo. Pretende-se fazer a avaliação da eficiência de escoamento de um sistema de drenagem sifônica de águas pluviais em coberturas, parcialmente colmatado.

1.1 Enquadramento

A drenagem de águas pluviais para edifícios geralmente cai em uma de duas categorias: tradicional ou sifônica. Os sistemas tradicionais encaminham a água proveniente das coberturas para caleiras e de seguida para ralos convenientemente posicionados. Estes estão geralmente conectados a um tubo de queda e trabalham em superfície livre.

O processo de dimensionamento dos sistemas tradicionais é formulado de forma a assegurar capacidade suficiente quer para as caleiras quer para os ralos, que deverão ser grandes o suficiente para não limitar o escoamento em superfície livre. Como cada tubo de queda é concebido de modo a que a área da secção transversal ocupada pela água esteja limitada a 20% a 33% da área total da secção transversal do tubo de queda, existem algumas limitações na conceção de sistemas tradicionais.

Por comparação, nos sistemas sifónicos o escoamento ocupa 100% da secção transversal do tubo de queda, cuja única força motriz é a diferença de altura entre o ralo de entrada e o coletor de saída que geralmente está localizado ao nível do terreno. A jusante do coletor de saída, o efeito sifónico é terminado e volta-se a estar em escoamento em superfície livre. Quando sujeito a intensidades pluviométricas baixas, um sistema sifónico vai operar em grande parte da mesma maneira que um sistema convencional. Contudo, quando a intensidade da chuva e a altura da lâmina de água na caleira aumentam, o efeito sifónico desenvolve-se, resultando em velocidades de escoamento cerca de dez vezes superior a um sistema tradicional. Esta passagem de escoamento a secção cheia dá-se graças aos ralos sifónicos que incorporam um dispositivo anti vórtice que evita a entrada de ar na tubagem. O efeito sifónico diz-se completo com a total ausência de ar nas tubagens. Nesta fase não produz vibração nem ruído.

1.2 Objetivos

Os sistemas sifónicos de drenagem de coberturas permitem, através de ralos de depressão, o escoamento de quantidades de água significativamente superiores às drenadas por sistemas convencionais de iguais dimensões. No entanto, se colmatados, os ralos perdem grande parte da sua eficiência.

Estudou-se teoricamente a constituição e funcionamento do sistema sifónico, os seus campos de aplicação bem como as suas vantagens relativamente a sistemas tradicionais.

Por via experimental realizaram-se ensaios relativos à colmatação parcial de ralos sifónicos, na torre hidráulica instalada no laboratório do Departamento de Engenharia Civil (DECivil) da Universidade de Aveiro (UA). Propunha-se analisar quantitativamente e qualitativamente a influência da colmatação deste tipo de ralos.

Assim, os trabalhos a que se refere esta dissertação foram divididos em cinco fases:

- i. a primeira fase consistiu na determinação do caudal máximo de escoamento, doravante designado por caudal Q_0 e da forma da colmatação a utilizar;
- ii. na segunda fase foi feito o levantamento das dimensões, instrumentação e instalação do equipamento de registo fotográfico na instalação experimental;

- iii. a terceira fase consistiu na realização de 390 ensaios, divididos em diferentes caudais e várias percentagens e formas de colmatação;
- iv. a quarta fase consistiu na visualização, tratamento e análise dos resultados obtidos de forma a retirar as conclusões devidas.
- v. por fim, na quinta e última fase procedeu-se à redação da presente dissertação.

1.3 Estrutura da dissertação

A dissertação encontra-se dividida em seis capítulos e um anexo. Para além do presente capítulo introdutório, no qual se faz uma breve abordagem ao tema dos sistemas de drenagem sifónica, objetivos e estrutura da dissertação, segue-se um capítulo de revisão bibliográfica, com a informação teórica, funcionamento, composição, vantagens e desvantagens deste tipo de sistemas. O capítulo inclui uma tabela resumo com a referência aos estudos experimentais pesquisados, inseridos na temática da drenagem sifónica, considerados no presente trabalho.

No terceiro capítulo procede-se à descrição da instalação experimental, das alterações efetuadas, dos equipamentos de medição utilizados para a realização dos ensaios, apresentam-se as condições experimentais, descreve-se a metodologia adotada e identificam-se os erros associados à incerteza experimental.

O quarto capítulo consiste na apresentação e descrição dos resultados obtidos nos ensaios realizados, nomeadamente, das alturas de água no tanque da cobertura, bem como a visualização de alguns fenómenos ocorridos.

No quinto capítulo analisam-se e interpretam-se os resultados obtidos dos ensaios realizados. São tiradas as conclusões para cada um dos caudais estudados. O Anexo 1 apresenta os gráficos das alturas de água no tanque da cobertura para cada um dos caudais ensaiados.

O corpo da dissertação termina com o sexto capítulo. Neste são apresentadas as conclusões mais importantes a reter e são indicadas sugestões para prosseguimento de trabalhos futuros.

Capítulo 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente capítulo aborda o conceito, a constituição e funcionamento do sistema sifónico ou sob pressão, bem como os estudos já realizados por outros investigadores, dentro do mesmo tema.

2.1 Introdução ao sistema sifónico

Existem dois tipos de sistemas de drenagem de águas pluviais: o sistema tradicional (Figura 2.1), geralmente designado por sistema gravítico, o sistema sifónico (Figura 2.2), também designado por sistema de vácuo ou sistema a secção cheia (Valsir, 2013).

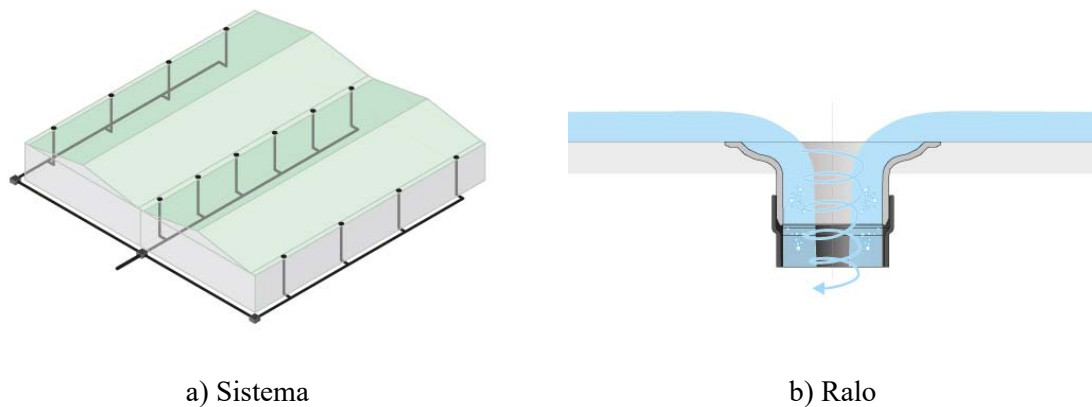


Figura 2.1: Sistema tradicional de drenagem de águas pluviais (Valsir, 2013).

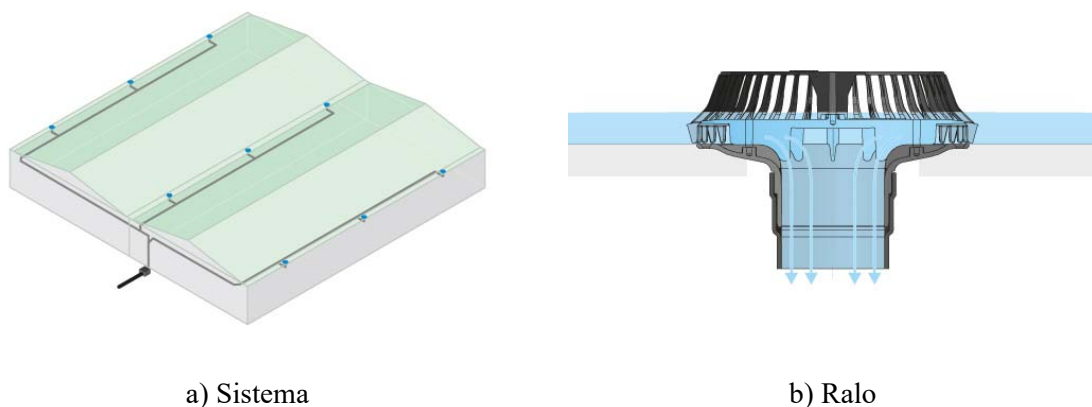


Figura 2.2: Sistema sifónico de drenagem de águas pluviais (Valsir, 2013).

Em termos de conceito, um sistema sifónico de drenagem de coberturas é um sistema que incorpora ralos especiais que permitem e sustentam pressões negativas no escoamento.

Previnem a entrada de ar na tubagem e a formação de vórtices, assegurando, portanto, a ocupação total da secção com maiores velocidades e caudais de escoamento.

Desenvolvido na Escandinávia na década de sessenta, é usado desde então por toda a Europa, Médio Oriente, Austrália, Ásia e Estados Unidos da América (SRDA, 2014). Em Portugal, no ano de 1996 são conhecidas as primeiras utilizações de um sistema sifónico (Pereira, 2012).

A regulamentação deste tipo de sistema de drenagem é feita na Europa pela norma EN 1253 e nos EUA pela normal americana ASME A112.6.9. Estas permitem a avaliação do desempenho de um sistema sifónico e definem os métodos de medição dos caudais de drenagem em função da altura de água na cobertura, dessa forma contribuindo para a análise dos vários regimes de escoamento (Smith, 2008).

O sistema sob pressão é constituído por dois componentes característicos: ralos anti vórtice (impedem a formação de vórtices, permitindo o escoamento em pressão e secção cheia) e o recurso a materiais e acessórios adequados às necessidades do funcionamento sob pressão (Silva, 2014).

2.2 Composição de um sistema sifónico

Existem diversas soluções comerciais de sistemas de drenagem sifónica. Em Portugal podemos encontrar, a título de exemplo, o *Akasion* da *Sanitop*, o *EPAMS* da *Saint-Gobain*, o *Pluvia* da *Geberit* ou o *Rainplus®* da *Valsir*.

Na sua essência, os sistemas sifónicos são simples, sem partes móveis ou mecânicas. A sua grande capacidade de escoamento deve-se ao seu dimensionamento, que permite um escoamento em pressão/depressão, contrariamente aos sistemas tradicionais, em que a água é escoada exclusivamente por gravidade.

Um sistema sifónico divide-se essencialmente em três componentes distintos (Pereira, 2012):

- 1) ralos;
- 2) tubagens;

3) sistemas de fixação.

2.2.1 Ralos

O primeiro e talvez mais importante componente do sistema sifônico é o ralo. O tipo de ralo sifônico a aplicar em determinado local está dependente do índice de pluviosidade desse mesmo local e do projeto, já que ele terá de ser adaptado em função dos diversos caudais previstos (que podem ir até, por exemplo, 100 l/s).

Este tipo de ralos é composto por três segmentos (Figura 2.3) (Silva, 2014):

- 1) O segmento superior reporta-se à área de entrada de água, que contém uma grelha lateral que contorna todo o perímetro do ralo (cuja função é, precisamente, obstar à entrada de detritos nocivos ao sistema). Superiormente, contém aberturas por onde é escoada a menor parte do caudal das águas que dão entrada no sistema. Estas aberturas são especialmente úteis quando a grelha lateral se encontra colmatada com detritos ou outras matérias;
- 2) A parte intermédia é constituída pela placa de montagem, que faz a ligação entre o ralo e a tubagem, e na qual está presente uma tela impermeabilizante que visa impedir infiltrações para o interior da laje. É nesta parte que se efetua a fixação do ralo ao suporte;
- 3) O último segmento faz a ligação do ralo ao ramal de descarga.

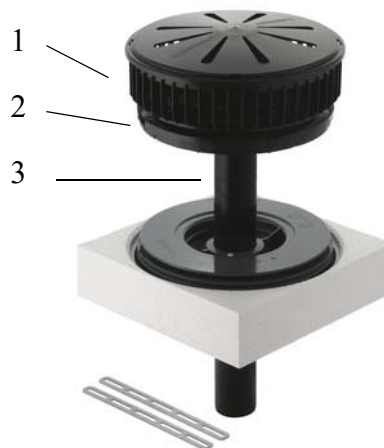


Figura 2.3: Ralo sifônico (retirado e adaptado de www.geberit.com a 05-01-2017).

2.2.2 Tubagens

Para se ligar os ralos à restante rede coletora, usa-se um sistema de tubagens (Figura 2.4). Recorre-se normalmente a tubos feitos por materiais resistentes e duradouros, tais como o Polietileno de Alta Densidade (PEAD). Este material permite ligações mais robustas, entre as quais a soldadura topo a topo ou a soldadura mediante união eletrossoldável. É, ainda, um material com ótima resistência à abrasão, o que é uma característica de grande importância, que conduz ao uso generalizado deste material (Pereira, 2012).



Figura 2.4: Sistema de tubagens de um sistema sifónico (retirado de <http://pacificpp.com> a 26-10-2016).

De facto, para além do efeito da pressão, verificam-se no sistema sifónico velocidades mais elevadas do que no sistema tradicional, pelo que o efeito de desgaste das tubagens é duplamente agravado. Nesse aspeto, é, portanto, necessário usar materiais com ótima resistência à abrasão. A *Geberit* possui no seu catálogo uma linha em PEAD enquanto que a *Saint-Gobain* detém uma gama em ferro fundido, por exemplo. Na Tabela 2.1 sintetizam-se valores médios para os parâmetros de três tipos de material comuns usados nas tubagens em instalações com sistemas sifónicos (Silva, 2014).

Tabela 2.1: Valores médios de parâmetros de três tipos comuns de materiais usados em tubagens de sistemas sifônicos (Silva, 2014)

Parâmetro	Material		
	PEAD	PVC	Ferro Fundido
Módulo de Young (MPa)	1 000	3 275	155 000
Tensão de rotura (MPa)	26,0	48,3	522,5
Força de impacto (J/cm)	5,59	0,61	>10
Índice de desgaste volumétrico	86	140	
Coefficiente de dilatação térmica linear ($E^{-6}/^{\circ}C$)	120	65	12
Calor específico (J/kg. $^{\circ}C$)	2 250	1 005	500
Temperatura de fusão ($^{\circ}C$)	121	180	1 200
Densidade (kg/m ³)	953	1 450	7 250

O módulo de elasticidade é um parâmetro que indica a resistência de um objeto ou material a ser deformado elasticamente. Um material mais rígido terá um módulo de elasticidade mais elevado. Assim, dos três materiais apresentados, o PEAD apresenta-se com o menor valor para este parâmetro, sendo, portanto, o menos rígido e o mais deformável. Os sistemas de drenagem devem absorver deformações da estrutura e por vezes atravessar juntas de dilatação. Assim, a flexibilidade (menor módulo de elasticidade) é uma característica favorável. No extremo oposto, o ferro fundido apresenta um módulo de elasticidade numa ordem de grandeza muito superior, evidenciando um material mais rígido e menos deformável.

Um outro parâmetro importante é o valor da tensão de rotura. Quanto menor o seu valor, maior terá que ser a espessura das paredes das tubagens usadas nas instalações, para a mesma solicitação.

O índice de desgaste volumétrico é um parâmetro obtido através de um ensaio que permite aferir o efeito da abrasão no material. Quanto menor o seu valor, maior será a resistência à abrasão.

A dilatação térmica é um outro parâmetro importante a ter em conta na escolha do material visto que existe a possibilidade de as tubagens serem colocadas no exterior dos edifícios, embora não necessariamente obrigatório. Assim, ficarão sujeitas a amplitudes térmicas cujo efeito não deve ser negligenciado.

Ao nível das ligações e articulações com outros elementos, esta variação de comprimento pode ser problemática. A variação dimensional com a temperatura calcula-se de acordo com a fórmula 2.1.

$$\Delta l = \alpha \times l \times \Delta t \quad (2.1)$$

em que:

- Δl variação de comprimento [m];
- α coeficiente de dilatação térmica linear;
- l comprimento da peça em estudo [m];
- Δt variação da temperatura [°C].

Neste tipo de sistema verificam-se velocidades mais elevadas, pelo que o efeito de desgaste nas tubagens é duplamente agravado. Neste aspeto, quer o PEAD quer o ferro fundido são materiais com muito boa resistência à abrasão (Pereira, 2012).

2.2.3 Sistemas de fixação

Como os sistemas sifônicos funcionam sob pressão negativa e com velocidades elevadas, as forças exercidas ao longo da tubagem, nomeadamente nas variações de inclinação/direção, tês ou alteração de diâmetro, são consideráveis. Daí surgir a necessidade dos sistemas de fixação responderem a essas exigências (Silva, 2014).

As forças exercidas em qualquer um dos pontos ao longo das tubagens podem ser calculadas com recurso ao teorema de Euler ou teorema da quantidade de movimento. Segundo este teorema, para um volume determinado no interior de um fluido, é nulo em cada instante o sistema das seguintes forças: peso, resultante das forças de contacto que o meio exterior exerce sobre o fluido contido no volume, através da superfície de fronteira, resultante das

forças de inércia e resultante das quantidades de movimento entradas para o volume considerado e dele saídas na unidade de tempo (Ruas *et al.*, 2005).



Figura 2.5: Estrutura metálica de fixação de tubagens (retirado de <http://www.geberit.com> a 09-12-2015).

As tubagens deverão ser fixadas ao teto e paredes, exceto se estiverem embutidas numa laje. Essas ligações são efetuadas através de uma estrutura metálica secundária (que irá funcionar como uma calha) ligada, também, às paredes e aos tetos (Figura 2.5). Na calha são fixadas braçadeiras de forma a que os tubos ali fiquem apoiados e possam deslizar ao longo das mesmas, proporcionando-lhes maior capacidade em absorver as dilatações e contrações da tubagem (Silva, 2014).

2.3 Funcionamento dos sistemas sifónicos

2.3.1 Princípio de funcionamento

O funcionamento deste sistema assenta no Teorema de Bernoulli aplicado ao escoamento de fluidos com viscosidade e atrito. Encontra-se exposto na Figura 2.6 e expressão 2.2.

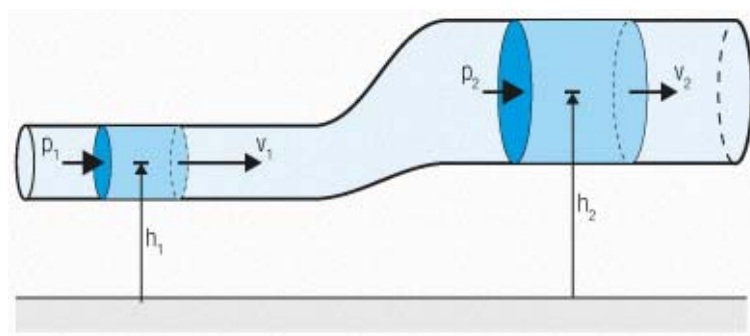


Figura 2.6: Teorema de Bernoulli aplicado a escoamento de fluidos com viscosidade e atrito (retirado e adaptado de www.valsir.it a 15-12-2016).

$$\frac{p_1}{\gamma} + h_1 + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\gamma} + h_2 + \frac{v_2^2}{2g} + \Delta H \quad (2.2)$$

em que:

- h_i cota geométrica do ponto i [m];
- p_i pressão relativa do ponto i [Pa];
- γ peso volúmico do fluido [N/mm³];
- v_i velocidade na secção i [m/s];
- g aceleração da gravidade [m/s²];
- ΔH perda de carga [m].

Entenda-se o significado físico das parcelas por unidade de peso:

h cota geométrica; representa a energia de posição da unidade de peso de uma partícula situada à cota h , relativamente a um plano horizontal de referência;

$\frac{p}{\gamma}$ altura piezométrica; representa a energia de pressão da unidade de peso de uma partícula submetida à pressão p ;

$\frac{v^2}{2g}$ altura cinética; representa a energia cinética por unidade de peso de uma partícula animada de velocidade v ;

$\frac{p}{\gamma} + h$ cota piezométrica; representa a energia potencial da unidade de peso de uma partícula (energia de pressão e de posição);

ΔH perda de carga; representa a diminuição da energia mecânica total da unidade de peso de uma partícula.

A parcela da perda de carga (expressão 2.3) decompõe-se em duas componentes: a perda de carga contínua (devida ao atrito entre o fluido e as paredes da tubagem – ΔH_c) e o somatório das perdas de carga localizadas (perdas de energia associadas a mudanças de diâmetro na tubagem, direção ou singularidades como válvulas, dispositivos e juntas – ΔH_l).

$$\Delta H = \Delta H_c + \sum \Delta H_l \quad (2.3)$$

em que:

- ΔH perda de carga [m];
 ΔH_c perda de carga contínua [m];
 ΔH_l perda de carga localizada [m].

O escoamento gravítico ocorre de forma anelar (ao nível dos tubos de queda). A água, ao aderir às paredes do tubo, vai acelerar até uma velocidade terminal em função da rugosidade e da viscosidade do fluido. Num sistema sifónico esta velocidade terminal não existe na medida em que para além da ação da gravidade tem que se levar em consideração o efeito da pressão que é a verdadeira força motriz e base do seu funcionamento.

Além da diferença de cotas entre o ponto inicial e final do escoamento, existe um outro fator que potencia a alteração do diferencial de pressões e que é explicado pelo efeito de Venturi (Figura 2.7).

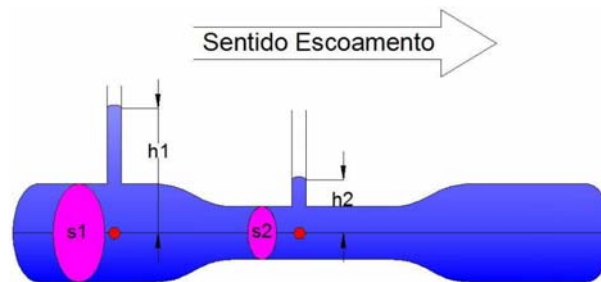


Figura 2.7: Efeito de Venturi na alteração da pressão do escoamento (Pereira, 2012).

Um tubo no qual está a ocorrer um escoamento em pressão e ao longo do qual existe uma redução no diâmetro, há continuidade de escoamento. Assim, o caudal que atravessa a secção 1 será o mesmo que atravessa a secção 2. Atendendo ao facto de que o caudal é definido pelo volume que atravessa uma determinada secção num dado espaço de tempo, tem-se:

$$Q = U \times S \quad (2.4)$$

em que:

- Q caudal [m^3/s];
 U velocidade de escoamento [m/s];
 S área da secção transversal [m^2].

Ou seja, para as duas secções:

$$Q_1 = Q_2 \Leftrightarrow U_1 \times S_1 = U_2 \times S_2 \quad (2.5)$$

Sintetizando, para o mesmo caudal, a velocidade aumenta quando a área da secção transversal diminui e vice-versa. Desta relação e mediante a aplicação do teorema de Bernoulli, desprezando as perdas de carga entre os dois pontos ilustrados na Figura 2.7 e tendo ainda em conta que as cotas dos dois pontos são iguais e que a pressão nestes pontos é dada pela altura da lâmina líquida acima destes, tem-se que:

$$h_1 + \frac{v_1^2}{2g} = h_2 + \frac{v_2^2}{2g} \Leftrightarrow h_1 - h_2 = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} \quad (2.6)$$

De onde se retira a seguinte conclusão: quando se altera a velocidade do escoamento, cria-se um diferencial de pressões. Este diferencial será negativo (efeito de pressão) se a velocidade a jusante for inferior à velocidade de montante e será positivo (efeito de sucção) se a velocidade de jusante for superior à velocidade de montante (Silva, 2014).

2.3.2 Modo de funcionamento

Como já discutido, num sistema sifónico o ralo impede a entrada de detritos, ar e a formação de vórtices, assegurando a ocupação total da secção do tubo, trabalhando assim o sistema com secção cheia e sob pressão. Nestas condições, o dimensionamento do sistema pode basear-se em modelos matemáticos de escoamento completamente desenvolvidos, trabalhando em pressão/depressão (princípio da conservação da energia de Bernoulli).

A particularidade do sistema sifónico assenta no facto de permitir que o escoamento de águas pluviais se dê num regime de escoamento em pressão negativa (Figura 2.8) (Pereira, 2012).

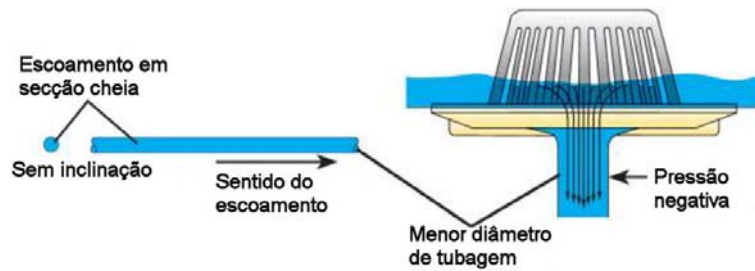


Figura 2.8: Escoamento num ralo sifónico (adaptado de Smith (2008)).

Todavia, em termos da sua operacionalidade, podemos considerar quatro tipos de regime em função da pluviosidade (Pereira, 2012, Silva, 2014).

Para uma pluviosidade que provoque caudais entre os 10% e 15% do caudal de projeto, o sistema sifónico funciona como um sistema tradicional de escoamento pluvial por ação da gravidade. É elevada a quantidade de ar no interior da tubagem. Em inglês assume a designação de *gravity flow* (Figura 2.9-a).

Para uma pluviosidade entre os 15% e 60% do caudal de projeto, o sistema opera alternadamente entre o sistema gravítico e em pressão, como consequência da capacidade de vazão de cada um dos modos de escoamento. Sendo a capacidade de transporte do sistema gravítico mais limitada, haverá acumulação de água na cobertura. Esta, no entanto, atingirá uma altura tal que, submergindo o prato anti vórtice, motive a entrada em pressão do sistema levando assim ao aumento da capacidade de vazão e velocidades nas tubagens. Em inglês assume a designação de *plug flow* (Figura 2.9-b).

Para caudais entre os 60% e 95% do caudal de projeto, o escoamento dá-se no regime sob pressão, embora possam ainda aparecer algumas bolhas de ar no seu interior. Neste tipo de regime, a tubagem está a trabalhar em secção cheia apesar da presença de bolhas de ar. A velocidade de escoamento atinge valores elevados graças ao efeito sifónico. Em inglês assume a designação de *bubble flow* (Figura 2.9-c).

Nos caudais superiores a 95% do caudal de projeto, atingem-se as capacidades máximas de vazão, assistindo-se a um escoamento silencioso, face à ausência de ar no interior das tubagens e à grande velocidade. Nesta fase, o efeito sifónico desenvolve-se na sua plenitude. Em inglês assume a designação de *full flow* (Figura 2.9-d).

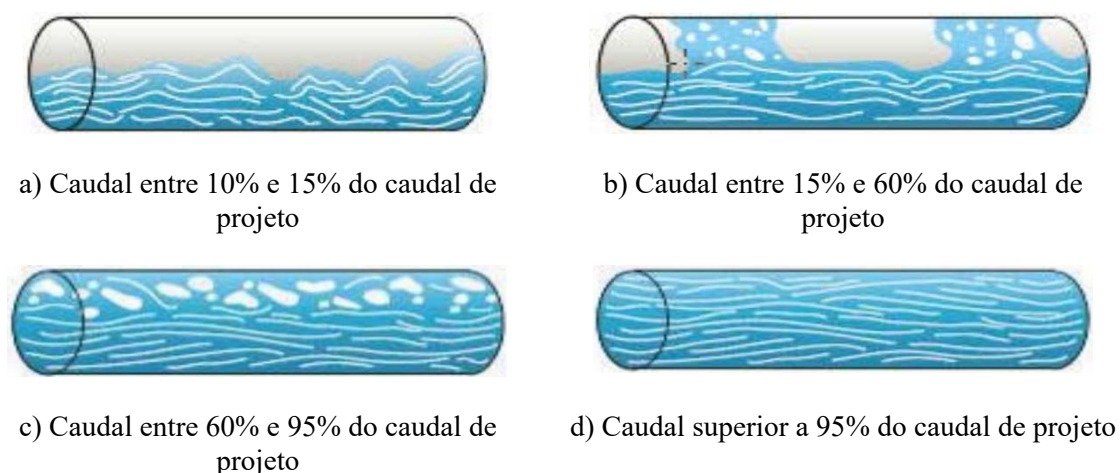


Figura 2.9: Tipos de regime de escoamento na tubagem de um sistema de drenagem sifônica (adaptado de Smith (2008)).

Importa ainda referir a necessidade de instalação de dispositivos de segurança que assegurem a descarga dos volumes excedentes. Estes irão permitir a drenagem das coberturas no caso de chuvadas de caudais superiores aos de projeto. Poderão ser utilizados descarregadores de superfície ou um sistema sifônico secundário com um tipo de ralo diferente (conhecido como *trop-plein*) que apenas entrarão em funcionamento no caso de o sistema principal não ter capacidade de vazão suficiente para o caudal existente ou estiver entupido. Aplicam-se quer ao sistema tradicional quer ao sifônico (Silva, 2014).

2.4 Vantagens e desvantagens

Há inúmeras vantagens de um sistema sifônico quando comparado ao sistema tradicional, entre as quais (Valsir, 2013):

- i. Redução do número e diâmetro dos tubos de queda;
- ii. Aumento de espaço interior com a possível colocação do tubo coletor de forma horizontal junto ao telhado ou da caleira;
- iii. Menor área de armazenamento, permitindo a redução de custos, e maior rapidez de execução.

Além das anteriores, possui grande flexibilidade do traçado e possibilidade de inclinações baixas ou mesmo nulas, revelando-se como uma das maiores diferenças deste para com o

sistema tradicional. O escoamento ao dar-se em pressão irá facilitar a condução da água, permitindo que as tubagens sejam implantadas horizontalmente.

Revela-se igualmente vantajoso por permitir reduzir o número de tubos de queda e também o número de caixas de ligação a executar, levando a uma poupança de custos e tempo de obra. Por não estar dependente da execução de outras tarefas, a sua instalação/montagem poderá ser remetida para o final da obra.

Acresce ainda que o sistema sifónico permite tubagens com diâmetros mais reduzidos ao mesmo tempo proporcionando capacidades de vazão superiores. Poder-se-á dizer que o sistema sifónico se revela tanto mais vantajoso quando maior for a área a drenar, devido à redução da quantidade de ralos e tubagens a utilizar (Silva, 2014).

Como desvantagem há a apontar o seu custo face a um sistema tradicional. Este sistema acarreta custos elevados na sua implementação devido provavelmente à existência de patentes associadas.

2.5 Aplicações

O sistema sifónico é o sistema mais indicado para efetuar a recolha e escoamento de água de coberturas em cotas elevadas, não sendo indicado, porém, para drenagem de águas freáticas ou ao nível de espaços térreos, uma vez que a sua eficácia depende da diferença de cotas dos pontos de admissão e saída de água do sistema (Silva, 2014).

A recolha ao nível da cobertura pode ser feita em superfícies planas (Figura 2.10-a) ou inclinadas (Figura 2.10-b). Em superfícies planas os ralos são implantados na própria cobertura e nas inclinadas são colocados em calhas/caleiras (Pereira, 2012).

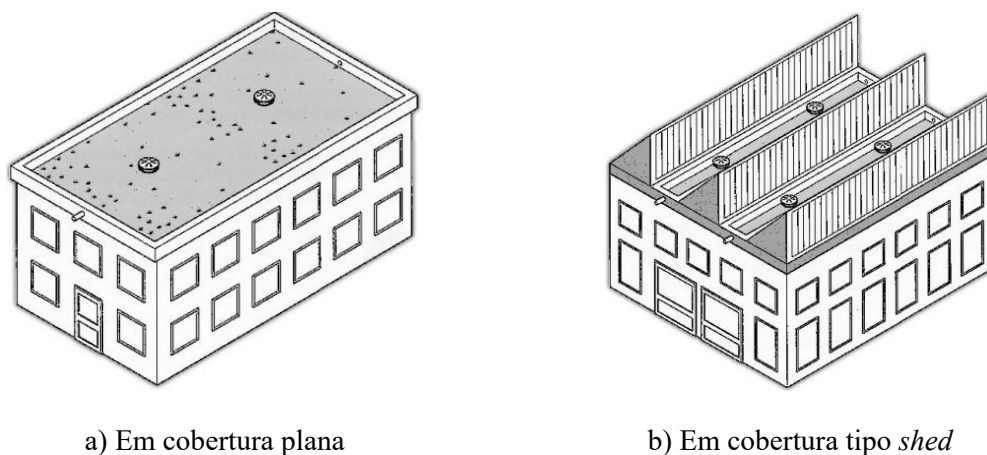


Figura 2.10: Aplicação do sistema sifônico (Pereira, 2012).

2.6 Dimensionamento do sistema sifônico

O dimensionamento é efetuado mediante o recurso a um *software* especializado e geralmente fornecido pelo próprio fabricante. Será em função dos projetos de estruturas e arquitetura do edifício, tendo em atenção a localização mais adequada para a colocação dos tubos de queda, a disposição dos ralos e as necessidades de aproveitamento de águas pluviais (Pereira, 2012).

O *software* consiste num programa de simulação de redes hidráulicas, mediante a aplicação do teorema de Bernoulli entre diferentes pontos de entrada e saída do sistema, no qual o caudal de cada ralo é conhecido. A disposição dos ralos deverá ser projetada prevenindo possíveis obstruções que reduzam o caudal previsto. Devem ser previstos eventuais sistemas de segurança ou *trop-plein* (Silva, 2014).

2.7 Recomendações

Os ralos devem ser colocados cerca de 2 cm abaixo da superfície superior da cobertura, de forma a se obter uma correta fixação sem afetar a sua impermeabilização. Devem distanciar entre si, aproximadamente 20 m quando ligados ao mesmo tubo de queda e a uma distância mínima de 1 m das platibandas e beirados, por serem pontos de acumulação de detritos.

Outro requisito a observar, está relacionado com a alteração de diâmetros nas tubagens horizontais. Pela Figura 2.11-a, no caso de haver redução de diâmetro pelo bordo superior pode ocorrer aprisionamento de ar pré-existente após o sistema entrar em pressão. Se a

redução de diâmetro ocorrer pelo bordo inferior (Figura 2.11-b) existe a impossibilidade de se escoar a água pluvial que ali fica concentrada (Silva, 2014).

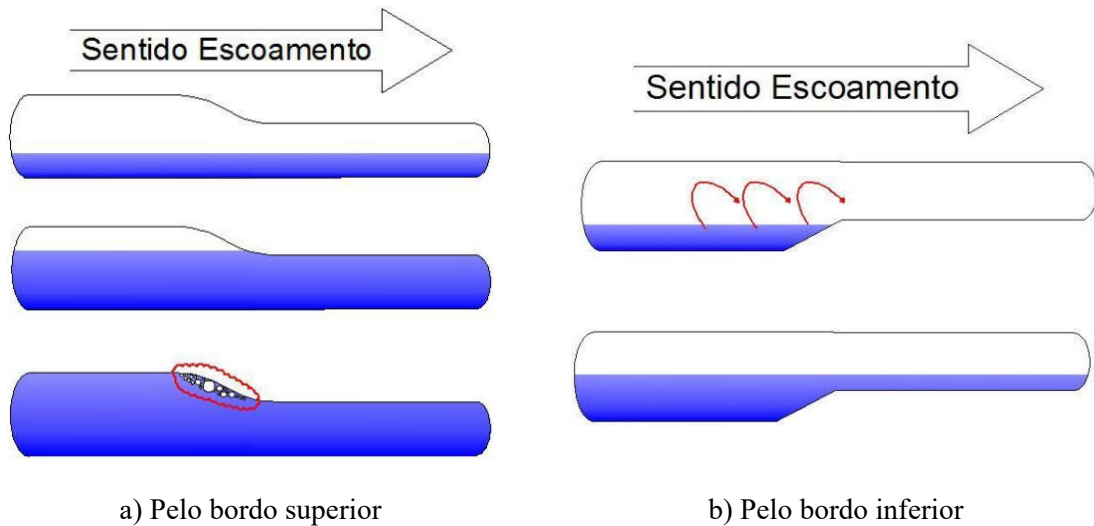


Figura 2.11: Redução de diâmetro nas tubagens horizontais (Pereira, 2012).

As reduções de diâmetro terão de ocorrer nos troços verticais, por forma a prevenir as disfunções acima descritas.

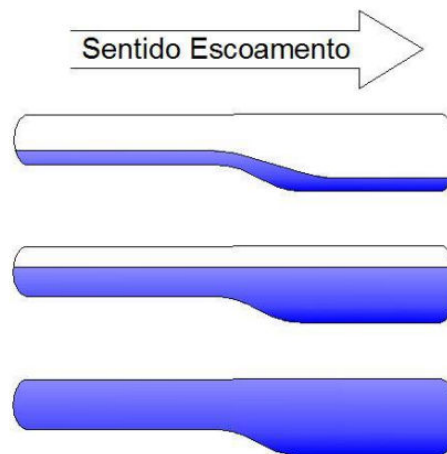


Figura 2.12: Aumento de diâmetro nas tubagens horizontais (Pereira, 2012).

O aumento de diâmetro da tubagem, deverá sempre ocorrer pelo seu bordo inferior (Figura 2.12) e de forma progressiva, a fim de garantir a continuidade do caudal e evitar a deposição de detritos nesse bordo (Silva, 2014).

Os sistemas de drenagem nas habitações estão ligados às redes de drenagem urbana, que funcionam em regime gravítico. Obriga assim que na parte final do sistema sifónico se faça

uma transição entre os dois sistemas (sifônico e tradicional). Esta transição é exigível devido às velocidades no sistema sifônico serem superiores ao do sistema tradicional. Uma das formas de realizar a transição é através de descompressão, mediante o aumento do diâmetro da tubagem de forma a anular o efeito de pressão e reduzir a velocidade do escoamento.

2.8 Análise de estudos anteriores

2.8.1 Influência da entrada de ar nas tubagens

Idealmente, os sistemas sifônicos são desenhados de modo a que a água que lá entre não contenha ar. Na prática, tal é difícil de acontecer (Arthur *et al.*, 1999a).

Em eventos de chuva de baixa intensidade, o sistema sifônico comporta-se como um tradicional. Quando a intensidade aumenta, pode ocorrer a despressurização parcial do sistema. Foram conduzidos testes na Universidade Heriot-Watt que demonstraram que esta despressurização resulta na elevada admissão de ar no sistema, que pode exceder o volume de água que também entra nas mesmas circunstâncias. A natureza instável deste regime de escoamento conduz a vários níveis de ruído produzido e vibrações que podem levar ao colapso de um dos componentes do sistema (Arthur *et al.*, 1999a).

Foi demonstrado experimentalmente (Arthur *et al.*, 2001a, Arthur *et al.*, 2005) que, em operação normal, até 10% do volume escoado é ocupado pelo ar. Lucke *et al.* (2010b) descobriram que a capacidade de escoamento do sistema pode diminuir aproximadamente 16% para um rácio de ar-água de 10% e até 40% para um rácio de ar-água de 45%.

Lucke *et al.* (2009) mostraram que a entrada de ar tem um papel fundamental no desempenho do sistema sifônico, em parâmetros importantes como a capacidade máxima de escoamento do sistema, as perdas por fricção, as pressões atingidas, a altura de lâmina de água de funcionamento e a capacidade de se atingir o efeito sifônico total.

Também foi investigado por Lucke *et al.* (2009) que a entrada de ar no sistema pode ser usada para controlar pressões negativas nos tubos verticais por forma a evitar a deformação das tubagens.

Lucke *et al.* (2010a), através de um estudo experimental, investigaram que uma altura de água de aproximadamente 250 mm acima do ralo sifónico, era o necessário para prevenir completamente a entrada de ar. Contudo, uma caleira com estas dimensões é de difícil aplicabilidade na maioria dos locais de instalação.

Arthur *et al.* (2001b) indicam três formas distintas de entrada de ar no sistema: ar já presente nas tubagens, ar que entra misturado na água das chuvas e ar que entra pelos ralos sifónicos.

2.8.1.1 Ar já presente nas tubagens

Antes de ocorrer a entrada de água num sistema sifónico, este já se encontra preenchido no seu interior com ar. Sistemas bem dimensionados, permitem a saída deste ar quer pelos ralos nas coberturas (à medida que o efeito sifónico se gera), quer pelos coletores subterrâneos (Arthur *et al.*, 2001b).

2.8.1.2 Ar que entra pelos ralos sifónicos

Devido à natureza turbulenta da água das chuvas, podem entrar grandes quantidades de ar dissolvido no sistema (Arthur *et al.*, 2001b).

Os ralos sifónicos são desenhados especificamente para impedirem a formação de um vórtice e a entrada de ar. A formação deste vórtice é impedida, na maioria dos casos, pela colocação de uma obstrução na entrada do sistema, cuja geometria varia de marca para marca. Algum ar ainda entra pela formação de pequenos vórtices ou pela dissolução de ar na água que entra no ralo (Arthur *et al.*, 2001a, 2001b).

May (1997) descobriu que as obstruções introduzidas nos ralos têm uma eficácia reduzida quando as pressões no sistema são suficientemente baixas.

O ar que entra quando na presença de pequenas lâminas de água, causa os problemas mais graves. De facto, se uma grande bolha de ar for admitida no sistema, pode causar uma súbita despressurização que depois se propaga a todo o sistema, quando atinge as tubagens verticais (Arthur *et al.*, 2001a, 2001b, May, 1997).

2.8.2 Saída do ar dos sistemas sifônicos

A saída de ar dos sistemas sifônicos pode ocorrer de duas formas: pelo ralo, à medida que a lâmina de água se forma, e pelo coletor de saída.

À medida que a lâmina de água se forma, é possível a saída de ar do sistema pelo ralo sifônico (Arthur *et al.*, 2001b). Contudo, assim que o escoamento a secção cheia se formar, o ralo sifônico não irá permitir a saída de mais nenhum ar acumulado nas tubagens (May, 1997). A maioria do ar preso no interior das tubagens irá ser removido pelos coletores de saída, desde que estes sejam de saída livre (Arthur *et al.*, 2001b).

2.8.3 A importância da consideração da presença de ar no dimensionamento dos sistemas sifônicos

No que à drenagem sifônica diz respeito, o efeito sifônico atinge-se quando todo o ar no sistema é substituído por água. Atualmente, os sistemas são desenvolvidos na presunção que a água que entra no sistema é desprovida de ar. Contudo, isto é difícil de atingir na prática pois o ar entra dissolvido na água. A presença de ar no escoamento tem três grandes efeitos: redução na capacidade do sistema, influência na velocidade de propagação e perdas de carga por fricção (Arthur *et al.*, 1999a, 2001b, Bramhall *et al.*, 2008).

2.8.4 Funcionamento em eventos extraordinários

Com a sociedade a sofrer já os efeitos das alterações climáticas, urge adaptar os sistemas de drenagem a estas alterações. Foram feitos estudos que mostram que os métodos atuais de dimensionamento não comportam as alterações necessárias que terão de ser feitas para que os sistemas de drenagem funcionem em eventos de chuvadas extraordinárias (Kelly *et al.*, 2010).

É referido por Kelly *et al.* (2010) o projeto DOWNPIPE, que foca o impacto que as alterações climáticas irão ter nos sistemas de drenagem e a assistência que terá de ser dada aos projetistas num futuro de condições climatéricas extremas.

Arnbjerg-Nielsen *et al.* (2013) no seu estudo sugerem proceder-se a alterações no dimensionamento e otimização da infraestrutura de drenagem urbana, de um modo rápido e flexível, que considere os impactos das alterações climáticas.

2.8.4.1 Sistemas tradicionais de drenagem

Wright *et al.* (2006) investigaram o funcionamento de sistemas de drenagem tradicionais de coberturas em eventos extraordinários, através de modelação numérica e de ensaios experimentais.

Com esta investigação, Wright *et al.* (2006) obtiveram as seguintes conclusões: não existe um modelo numérico capaz de simular o funcionamento de sistemas tradicionais de drenagem, apenas existem modelos básicos e comerciais destinados a sistemas sifónicos de drenagem; sistemas tradicionais irão sempre funcionar em superfície livre, independentemente da intensidade pluviométrica ou da lâmina de água; a passagem do escoamento a secção cheia significa que estes sistemas irão ter uma capacidade de escoamento superior àquela para que foram dimensionados.

2.8.4.2 Sistemas sifónicos de drenagem

Beattie *et al.* (2011) levantam a questão se se deverão dimensionar os sistemas sifónicos tendo já em conta as mudanças previstas na intensidade pluviométrica, com base na disponibilidade de dados existentes sobre as alterações climáticas. Segundo os autores, na Escócia, a temperatura aumentou aproximadamente 0,8 °C desde 1980, com tempo cada vez mais seco e maior número de eventos de chuvadas extraordinárias. Estes dois cenários oferecem as condições ideais para a falha dos sistemas de drenagem sifónica.

As tubagens de sistemas sifónicos têm tipicamente diâmetros entre os 50 mm e os 65 mm e são particularmente sensíveis a entupimento durante o período de tempo seco e a encher em demasia e vazar pelo topo das caleiras nos eventos de chuvadas extraordinárias. Graças ao registo das ocorrências de grandes chuvadas nos últimos 50 anos, o dimensionamento e período de retorno adotado ganham grande ênfase.

Em sistemas tradicionais de drenagem por gravidade, os detritos acumulados nas caleiras são mais tolerados, pois os tubos de queda são geralmente maiores do que os dos sistemas

de drenagem sifônica equivalentes. A manutenção das coberturas é muitas vezes negligenciada ou ignorada. Contudo, para um sistema sifônico onde a intensidade de precipitação é mais tida em conta no dimensionamento, é importante que a limpeza periódica seja realizada, sob pena de as falhas no sistema serem bastante onerosas. Detritos como restos de folhas transportadas pelo vento ou materiais depositados por pássaros, podem acumular-se rapidamente dentro de uma caleira, e conseqüentemente, colmatar os ralos sifônicos durante um evento de chuvada extraordinária (Beattie *et al.*, 2011).

Jack (2008) e Jack *et al.* (2011, 2012) também estudaram o impacto das alterações climáticas nos sistemas de drenagem sifônica. Os resultados experimentais mostraram que no futuro estes sistemas poderão estar subdimensionados. É lembrado pelos investigadores que o dimensionamento para o nível de pluviosidade adequado é extremamente importante para o correto funcionamento destes sistemas. Mostram, também, que a acumulação de detritos nos dois locais é bastante significativa. Finalmente, os dados obtidos nos seus estudos mostram o potencial impacto que as alterações climáticas poderão ter. É sugerida uma adaptação progressiva dos projetistas a estas alterações.

2.8.5 Estudos experimentais

2.8.5.1 Tabela resumo dos estudos experimentais pesquisados nas fontes bibliográficas

Na Tabela 2.2, mostra-se o resumo dos vários estudos experimentais pesquisados. Nesta tabela, pode-se observar a evolução ao longo dos anos de um mesmo estudo feito por um investigador ou conjunto de investigadores, em várias publicações, desde jornais, conferências ou teses.

Tabela 2.2: Tabela resumo dos vários estudos experimentais pesquisados nas fontes bibliográficas.

Investigadores	Objeto de estudo	Tipo de estudo	Escala
Arthur <i>et al.</i> (1999a), Arthur <i>et al.</i> (1999b), Arthur <i>et al.</i> (2001b)	Modelação numérica do desenvolvimento do efeito sifónico.	Experimental e numérico	Escala reduzida
Arthur <i>et al.</i> (2005)	Funcionamento de um sistema sifónico instalado.	Experimental	Escala real
Beattie <i>et al.</i> (2011), Beattie <i>et al.</i> (2012), Beattie (2013), Jack <i>et al.</i> (2014), Kelly <i>et al.</i> (2010)	Acumulação de detritos em sistemas sifónicos existentes..	Experimental e numérico	Escala real
Bramhall <i>et al.</i> (2008)	Desenvolvimento do efeito sifónico	Experimental	Escala reduzida
Campbell (2013, 2014)	Dispositivo de controlo do escoamento em sistema sifónico.	Experimental	Escala reduzida
Jack (2008), Jack <i>et al.</i> (2011), Jack <i>et al.</i> (2012), Kelly <i>et al.</i> (2010), Kelly <i>et al.</i> (2011), Kelly <i>et al.</i> (2012), Wright <i>et al.</i> (2006), Wright (2007)	Efeito das alterações climáticas em sistemas de drenagem sifónica.	Experimental e numérico	Escala real
Lucke <i>et al.</i> (2009), Lucke <i>et al.</i> (2010a), Lucke <i>et al.</i> (2010b)	Influência do ar nas tubagens de sistemas de drenagem sifónica.	Experimental	Escala real
Lucke (2011), Qu <i>et al.</i> (2011)	Medição de caudais em tubagens de sistemas de drenagem sifónica.	Experimental	Escala real
May (1997)	Dimensionamento de sistemas de drenagem sifónica.	Teórico	N. A.
Öngören <i>et al.</i> (2006)	Medição de caudais em tubagens de sistemas de drenagem sifónica com secção não totalmente cheia .	Experimental e numérico	Escala reduzida
Pereira (2012)	Sistemas sifónicos ou em pressão.	Teórico	N. A.
Silva (2014)	Funcionamento hidráulico de um sistema de drenagem sifónica.	Experimental	Escala reduzida
Wright <i>et al.</i> (2002), Arthur <i>et al.</i> (2005)	Sistemas sifónicos de múltiplos ralos.	Experimental e numérico	Escala reduzida

2.8.5.2 Sistemas sifónicos *versus* sistemas tradicionais

Pereira (2012) estudou o funcionamento de sistemas sifónicos ou em pressão, de drenagem pluvial de edifícios, com o objetivo de elucidar o seu funcionamento e procurar comparar a

aplicação deste sistema face aos sistemas de drenagem tradicionais. Analisou cada um dos sistemas, com as suas características intrínsecas, dando especial detalhe ao sistema sifónico.

Pereira (2012) propôs-se recolher projetos de edifícios já executados, cuja drenagem fosse feita com recurso a um sistema sifónico e compará-los com soluções tradicionais por si projetadas.

Concluiu, como principais potencialidades do sistema sifónico face ao sistema tradicional: inexistência de pendentes nos traçados horizontais; redução do diâmetro e número de tubos de queda e de caixas de ligação a executar; redução dos diâmetros das tubagens; diminuição das escavações para tubagens enterradas; diminuição do número de caixas de ligação a executar; possibilidade de pré-fabricação.

Como desvantagens do sistema sifónico face ao sistema tradicional, Pereira (2012) apontou os seguintes aspetos: solução não muito económica para pequenas áreas a drenar ou coberturas que pela sua geometria dificultem a afetação de uma grande área a um mesmo ralo; pode ocorrer acumulação de alturas de água na cobertura cujas cargas deverão ser previstas à priori; dificuldade na drenagem de coberturas a diferentes cotas por um mesmo sistema; dificuldade de aproveitamento satisfatório em coberturas com geometrias muito irregulares com múltiplas saliências e reentrâncias.

2.8.5.3 Funcionamento hidráulico de um sistema de drenagem sifónica aplicado a um sistema de aproveitamento de águas pluviais (SAAP)

Silva (2014) estudou sistemas de aproveitamento de águas pluviais, que permitem substituir a água de uso doméstico, sem exigência de potabilidade, por água pluvial devidamente recolhida, tratada e fornecida. Para tal usou uma instalação experimental que inclui um sistema de drenagem sifónica, para desenvolver o propósito pretendido. Fez ensaios com e sem corante na água.



Figura 2.13: Sistema de drenagem sifônica usado por Silva (2014).

Esta instalação (Figura 2.13) é dotada de uma caixa em acrílico com as dimensões de 120x100x19 cm, onde foi recolhida a água proveniente de quatro chuveiros que pretendem simular a queda e receção de chuva.

Silva (2014) confirmou experimentalmente os dados fornecidos pelo fabricante relativamente à velocidade da água necessária para que o escoamento na tubagem se dê a secção cheia. Observou, através das imagens recolhidas em vídeo, que quando o sistema ainda não funciona em pressão, a água tem sempre algum retorno, contaminando a água a montante. Contudo, após entrada em pressão e com a velocidade que ela provoca, a água com corante já não se mistura com a água limpa a montante.

Silva (2014) no seu estudo obteve resultados acerca da existência de ar na tubagem neste tipo de sistemas, das perdas de atrito do material utilizado, da altura de água na tubagem e, ainda, aos níveis de água alcançados na cobertura. O mesmo autor refere ainda que a capacidade máxima do sistema sifónico diminui com a entrada de ar no seu interior. Porém, essa redução não é linear, circunstância essa que fica a dever-se ao facto do volume das bolhas de ar se expandir significativamente, ocupando assim maior volume no interior do tubo.

2.8.5.4 Efeitos da colmatção de sistemas sifónicos de drenagem

Os efeitos da colmatção de sistemas sifónicos de drenagem foram estudados por Beattie (2013) e por Beattie *et al.* (2011, 2012), que mediram os seguintes parâmetros: gravação de

imagens dos ralos sifônicos, intensidade pluviométrica, direção e velocidade do vento, temperatura e humidade relativa, altura da lâmina de água na caleira e pressões no sistema.

Thomas Thompson House

O primeiro local escolhido por Beattie (2013) e por Beattie *et al.* (2011, 2012) é composto por uma área monitorizada na cobertura de aproximadamente 2094 m² com cinco instalações sifônicas independentes. Duas destas instalações foram instrumentadas e monitorizadas: a instalação 1, sistema sifônico de dois ralos e a instalação 2, sistema sifônico de um só ralo. Ambas as instalações são fabricadas com tubagens em aço inoxidável e diâmetro interno de 50 mm. O objetivo da monitorização no local (Figura 2.14) foi o de identificar os detritos e ajudar a estimar a velocidade de subida de água nos ralos sifônicos.



Figura 2.14: Thomas Thompson House, evidenciando o posicionamento das câmaras e dos ralos monitorizados (adaptado de Beattie *et al.* (2011)).

As imagens foram recolhidas com os seguintes objetivos: quantificar a magnitude da acumulação de detritos entre operações de manutenção; permitir a análise de como a época do ano afeta a acumulação, a quantidade e o tipo de detritos; permitir a análise de como os detritos afetam o desempenho do sistema sifônico e, por fim, permitir a análise de qual a quantidade de detritos que se acumula nas épocas de tempo seco (Beattie, 2013, Beattie *et al.*, 2011, 2012).

O sistema de monitorização foi mantido em funcionamento durante 15 meses. Este período de tempo permitiu uma boa recolha de informação entre operações de manutenção (Figura 2.15).



Figura 2.15: Imagens das caleiras, recolhidas entre operações de manutenção (adaptado de Beattie *et al.* (2011)).

Beattie (2013) e Beattie *et al.* (2011, 2012), baseados na informação dos detritos providenciada pelas imagens recolhidas, confirmaram o efeito da perda de pressão numa variedade de colmatações introduzidas nos ralos sifónicos, para caudais entre 1 e 9 l/s.

Os resultados indicam que as pressões na instalação experimental montada em laboratório começaram a alterar para uma colmatção de 85% na base do ralo e para 72% da grelha do ralo. Os dados obtidos foram idênticos para vários tipos de ralos testados.

Estes investigadores concluíram ainda que a acumulação de detritos pode ser bastante grande se não forem efetuadas operações de manutenção regulares. Os resultados experimentais mostraram que quanto maior o bloqueio, maior a pressão negativa. Concluíram também que quanto maior a percentagem de colmatção, maiores as perdas de pressão, nos vários ralos testados. Observaram que este local sofreu problemas no funcionamento do sistema sifónico, devido a alguns ralos colmatados.

Ibrox Stadium

O segundo local de estudo escolhido por Beattie (2013), Beattie *et al.* (2011, 2012) foi o Ibrox Stadium. Este possui três sistemas tradicionais de drenagem e um sistema sifónico. Este último foi o monitorado (Figura 2.16). Possui uma área da cobertura de aproximadamente 5200 m², escoada por dois sistemas sifónicos. Cada sistema drena metade da área da cobertura (2600 m²). Não existem operações de manutenção regulares. Os ralos são limpos esporadicamente aquando da visita ao telhado por técnicos. São avistados pássaros regularmente a habitar no local.

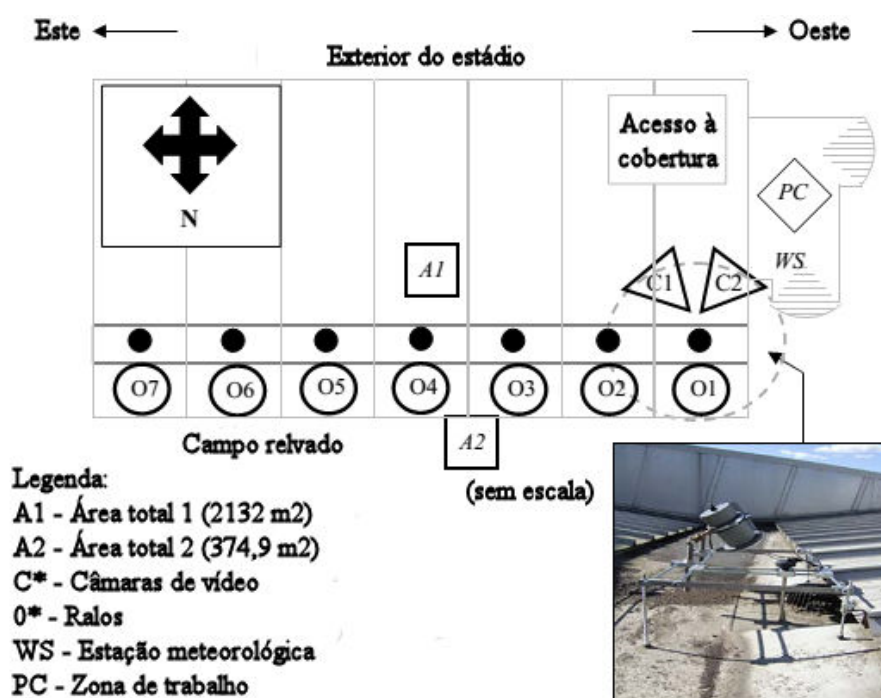







Figura 2.16: Ibrox Stadium. Representação esquemática das áreas monitorizadas (adaptado de Beattie (2013)).

As imagens foram recolhidas continuamente em intervalos de dois minutos. Além das imagens, foram recolhidos os dados da precipitação, humidade relativa, temperatura e direção e velocidade do vento. A evolução da colmatação por acumulação de detritos pode observar-se na Tabela 2.3.

Tabela 2.3: Evolução da quantidade de detritos acumulados na caleira do Ibrox Stadium (adaptado de Beattie *et al.* (2012)).

0	Percentagem de colmatação (aproximadamente)			
	≤ 2	≤ 6	≤ 8	≤ 10
Limpo	Ligeira acumulação de detritos	Moderada acumulação de detritos	Moderada/alta acumulação detritos	Alta acumulação de detritos
				

Beattie (2013) e Beattie *et al.* (2011, 2012) concluíram que o sistema sifónico operou normalmente devido à pouca acumulação de detritos. Este estudo permitiu observar a quantidade de detritos que se acumula ao longo do ano, tais como folhas e penas de aves. Permitiu igualmente estabelecer a relação que certos parâmetros, tal como a precipitação e a temperatura, exercem grande influência na colmatação dos ralos sifónicos. Este local não apresentou falhas no funcionamento, o que sugeriu que o grau de colmatação atingido não foi o suficiente para interferir nos componentes do sistema.

2.8.5.5 Sistemas de um só ralo *versus* sistemas de múltiplos ralos

Wright *et al.* (2002) estudaram um sistema de múltiplos ralos. Neste sistema, vários ralos sifónicos estão conectados ao mesmo tubo de queda. No âmbito deste estudo, foi montado um sistema deste tipo em laboratório, segundo se pode observar na Figura 2.17.

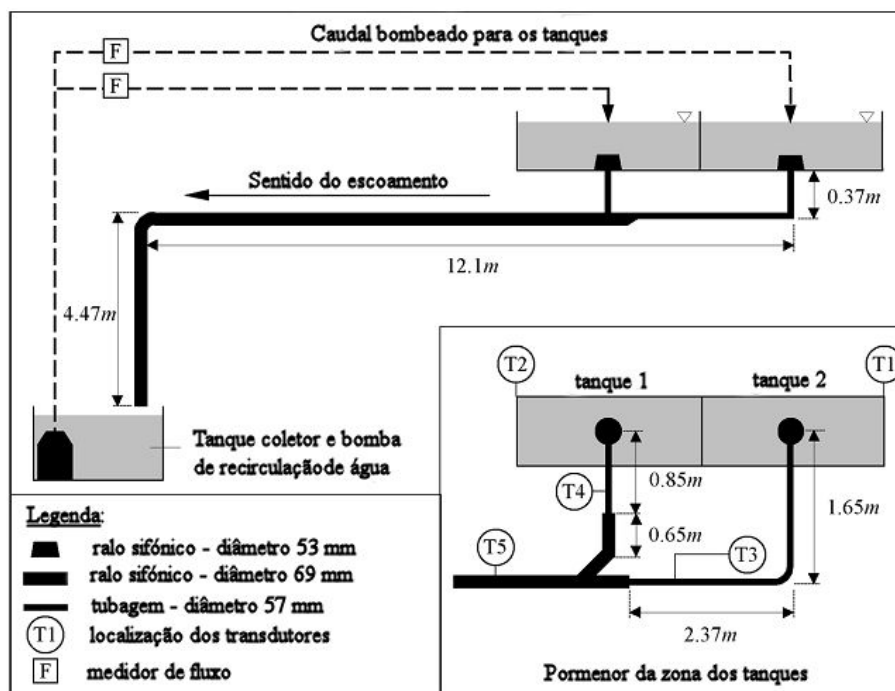


Figura 2.17: Representação esquemática do sistema sifônico testado (adaptado de Wright *et al.* (2002)).

Wright *et al.* (2002) concluíram o seguinte: o desenvolvimento do efeito sifônico de um sistema de múltiplos ralos é semelhante, se bem que mais complexo, ao de um sistema de um só ralo; os métodos atuais de dimensionamento podem conduzir a pressões inadequadas, o que poderá causar problemas de operação ou, até mesmo, falhas; para níveis de pluviosidade abaixo do caudal projetado, as condições de escoamento de um sistema de múltiplos ralos são instáveis e alternam entre um de três regimes de escoamento; a colmatação total de um dos ralos, num sistema de múltiplos ralos pode conduzir a pressões abaixo do dimensionado e resultar na falha do sistema por cavitação ou deformação das tubagens; por forma a garantir a operação perfeita de um sistema de drenagem sifônica de coberturas, tem de ser dada especial atenção à ligação entre o ralo e o sistema de tubagens. Adicionalmente, Wright *et al.* (2002) desenvolveram o modelo numérico que serve de base ao dimensionamento de sistemas de múltiplos ralos para várias condições de precipitação.

2.8.5.6 Medição de caudais em tubagens de sistemas de drenagem sifónica com secção não totalmente cheia

Qu *et al.* (2011) estudaram a medição de caudais em tubagens de sistemas de drenagem sifónica com secção não totalmente cheia. O seu objetivo era desenvolver uma técnica de medição capaz de determinar os caudais de escoamento em sistemas de drenagem sifónica. Os resultados mostraram que a sua técnica de medição é capaz de prever satisfatoriamente os caudais em sistemas de drenagem de coberturas à escala real.

2.8.6 Estudos numéricos

Arthur *et al.* (1999a) desenvolveram vários modelos numéricos destinados a simular o regime instável presente nos sistemas sifónicos. Estes formam a base do modelo ROOFNET que simula a resposta de um sistema sifónico instalado.

2.8.6.1 Método das Características

O Método das Características é uma técnica para resolver equações diferenciais parciais, aplicável tipicamente a equações parciais de primeira ordem. Aplica-se na mecânica dos fluídos a problemas governados por equações diferenciais parciais do tipo hiperbólico. Este método serve para reduzir uma equação diferencial parcial a uma família de equações diferenciais ordinárias cuja solução pode ser integrada a partir de valores iniciais. É o método mais utilizado para escoamentos variáveis, pois é o que apresenta excelentes resultados em termos de exatidão da solução (caudais e pressões).

À medida que um coletor de um sistema sifónico começa a trabalhar em secção cheia, o sistema irá começar a despressurizar, tornando o método de MacCormack não aplicável. Nesta fase, torna-se necessário alterar para o Método das Características com secção cheia. Tal como no Método de MacCormack, o Método das Características requer valores de fronteira para poder ser solucionado (Wright *et al.*, 2005).

2.8.6.2 Método ROOFNET

Jack *et al.* (2014) explicam que o método ROOFNET, inicialmente criado sob o nome SIPHONET, usa o Método das Características com as equações de continuidade e de

momento. Permite a determinação do caudal escoado e da pressão em pontos nodais definidos em planos temporais e espaciais. O início da investigação deste método focava-se principalmente na simulação dos passos conducentes ao efeito sifónico. Posteriormente, o método MacCormack seria usado para melhor simular a formação do ressalto hidráulico no tubo coletor.

2.8.6.3 Método MacCormack

O modelo numérico inicial existente, desenvolvido na Universidade de Heriot-Watt, utiliza o Método das Características para simular escoamentos de superfície livre e secção cheia. Contudo, durante o desenvolvimento do método SIPHONET2, Wright *et al.* (2005) concluíram que o Método das Características não era particularmente apropriado para a simulação numérica de ressaltos hidráulicos móveis em tubagens tão complexas quantas as usadas em sistemas de múltiplos ralos.

Graças à complexidade da formação do efeito sifónico e dos ressaltos hidráulicos móveis, Wright *et al.* (2005) usaram o método MacCormack que simula o escoamento inicial em superfície livre, embora retendo o Método das Características para a simulação em secção cheia.

O método de MacCormack não é aplicável a tubagens verticais onde o escoamento de superfície livre é simulado usando métodos baseados no volume escoado (Wright *et al.*, 2005).

2.8.6.4 Dinâmica dos Fluidos Computacional

Por forma a estudar o comportamento do escoamento de uma série de sistemas de drenagem sifónica de coberturas, Öngören *et al.* (2006) usaram um *software* de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD, do inglês *Computational Fluid Dynamics*).

Estes investigadores, a par com a parte experimental montada, usaram o *software* de CFD para estudar os detalhes da sucção de ar do escoamento no ralo sifónico e tubos de queda. Usaram a simulação de CFD para estudar o escoamento a secção parcial e cheia.

Capítulo 3

MÉTODO EXPERIMENTAL

3 MÉTODO EXPERIMENTAL

Neste capítulo descreve-se o objeto de estudo que consiste o sistema de drenagem sifónica de águas pluviais em coberturas, parcialmente colmatado, respetiva instalação e metodologia experimental adotada. Descreve-se igualmente o equipamento experimental utilizado, alterações introduzidas e apresentam-se as condições experimentais.

3.1 Instalação Experimental

A instalação experimental encontra-se montada no Laboratório de Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro, em Aveiro. Consiste num sistema de drenagem sifónica de águas pluviais em coberturas e é parte integrante da torre hidráulica cedida e instalada pela Geberit Tecnologia Sanitária, S.A. (Figura 3.1).



Figura 3.1: Torre Hidráulica da Universidade de Aveiro.

3.1.1 Reservatório de armazenamento de água

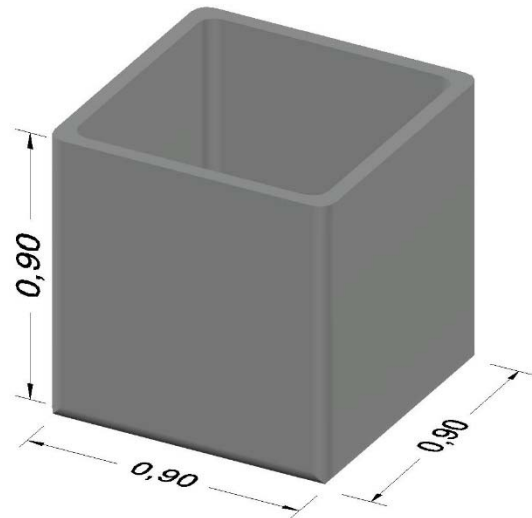
A instalação experimental funciona em circuito fechado de alimentação de água, proveniente de um reservatório de armazenamento de água. Assim, a altura de água no reservatório é mantida entre um valor máximo e mínimo, por forma a permitir o correto funcionamento da

bomba e alimentação contínua do sistema, sem gastos desnecessários de água da rede de abastecimento do laboratório.

No reservatório de armazenamento de água (modelo Geberit 750), com 700 litros de capacidade, encontra-se instalada uma bomba para circulação de água. Esta é responsável pelo bombeamento da água desde o depósito até ao topo da cobertura que alimenta o sistema de drenagem sifônica. O reservatório tem uma configuração cúbica com 0,90 metros de lado (Figura 3.2).



a) Reservatório



b) Esquema do reservatório (dimensões em metros)

Figura 3.2: Reservatório de armazenamento de água.

3.1.2 Quadro elétrico e controlador da bomba de água

O caudal de água descarregado na cobertura da instalação experimental é alimentado por uma bomba de água comandada a partir de um quadro elétrico com um controlador Danfoss modelo VLT® 6000 (Figura 3.3). É possível assim fazer variar o caudal vertido sobre a cobertura para os vários caudais necessários ao estudo. Este controlador permite definir as rotações por segundo (hertz) de funcionamento da bomba.



a) Quadro elétrico



b) Controlador Danfoss VLT® 6000

Figura 3.3: Quadro elétrico e controlador da bomba de água.

3.1.3 Bomba de água

A água é elevada por uma bomba, modelo Grundfos AP12.50.11.3 (Figura 3.4) que tem as suas especificações técnicas descritas na Tabela 3.1 e na Figura 3.5, onde P_1 é a potência máxima, P_2 é a potência mínima, I_n é a corrente nominal, $\cos \varphi$ é o fator de potência, H é a altura de elevação máxima a 50 Hz e Q é o caudal bombeado.



a) Fotografia de catálogo (retirado de www.grundfos.com a 09-09-2016)



b) Bomba de água instalada

Figura 3.4: Bomba de água Grundfos AP12.50.11.3.

Tabela 3.1: Especificações técnicas da bomba de água Grundfos AP12.50.11.3 (Grundfos, 2016).

Característica	Grundfos AP12.50.11.3
Tensão (V)	3 x 400
P ₁ (kW)	1,9
P ₂ (kW)	1,1
I _n (A)	3,2
cos φ	0,88

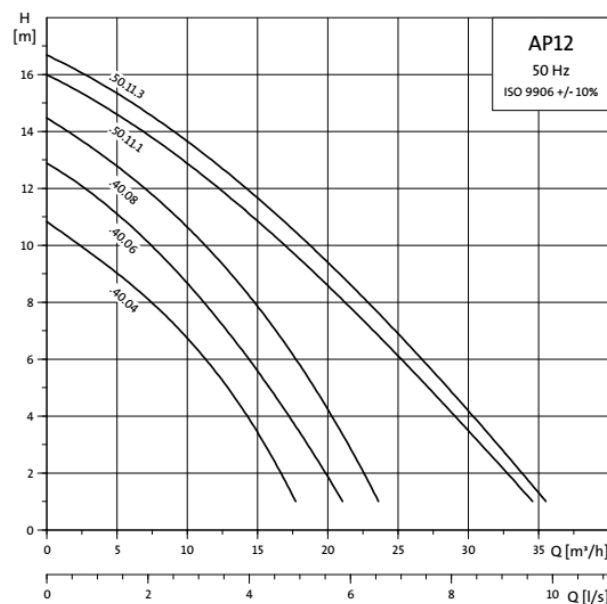


Figura 3.5: Altura de elevação máxima a 50 Hz da bomba de água Grundfos AP12.50.11.3 (Grundfos, 2016).

3.1.4 Tubagem de fornecimento de água à cobertura

O caudal fornecido desde a bomba de água até à cobertura é assegurado por tubagem de polietileno de alta densidade (PEAD), modelo Geberit Mepla 63 x 4,5 (Figura 3.6). Este tubo tem como função simular a queda e receção da água da chuva na cobertura. A Tabela 3.2 apresenta as características técnicas deste tubo.



Figura 3.6: Tubo Geberit Mepla 63 x 4,5.

Tabela 3.2: Especificações técnicas do tubo Geberit Mepla 63 x 4,5 (Geberit Tecnologia Sanitária, 2005a).

Característica	Geberit Mepla 63 x 4,5
Diâmetro e espessura do tubo (mm)	63 x 4,5
Diâmetro interno (mm)	54
Volume de água (l/m)	2,29
Rugosidade da superfície interna (mm)	0,007
Pressão de serviço (bar)	10
Raio mínimo de curvatura com máquina (cm)	-

A Figura 3.7 apresenta o esquema altimétrico da tubagem de fornecimento de água à cobertura, desde a bomba até à caixa acrílica.

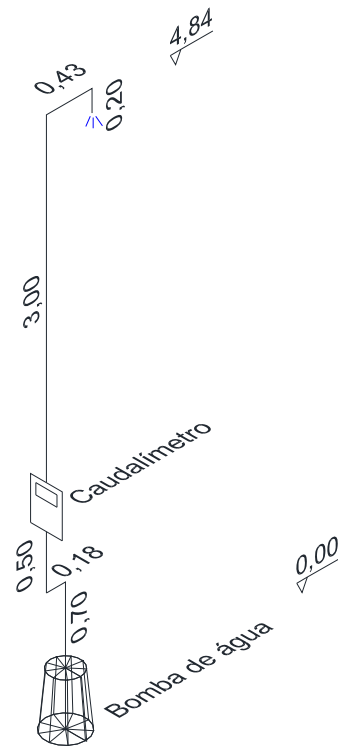


Figura 3.7: Esquema altimétrico da tubagem de fornecimento de água à cobertura (dimensões em metros).

3.1.5 Caudalímetro eletromagnético e conversor de sinal

Um caudalímetro eletromagnético (modelo KROHNE OPTIFLUX 2000), acoplado a um conversor de sinal (modelo KROHNE IFC 100), instalado à saída da bomba de água, permite medir o caudal fornecido à cobertura (Figura 3.8).



a) Caudalímetro eletromagnético



b) Conversor de sinal

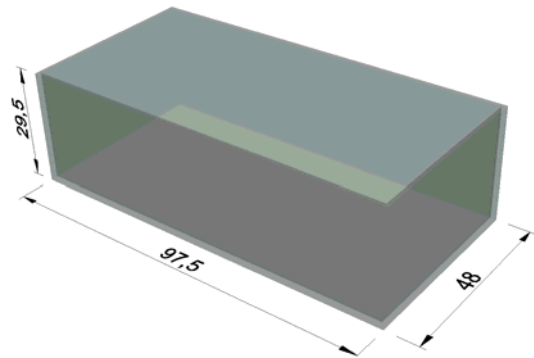
Figura 3.8: Caudalímetro eletromagnético e conversor de sinal.

3.1.6 Depósito de água da cobertura

A cobertura do sistema de drenagem sifônica de águas pluviais, aqui simulada por um depósito em acrílico com as dimensões de 97,5 x 48 x 29,5 cm e capacidade máxima de 138 litros, alberga a água proveniente de um tubo ligado à bomba.



a) Depósito de água



b) Esquema do depósito de água
(dimensões em centímetros)

Figura 3.9: Depósito de água da cobertura.

3.1.7 Ralo sifônico

Na cobertura encontra-se montado um ralo sifônico (modelo Geberit Pluvia) (Figura 3.10) que encaminha para a tubagem a água recolhida.



Figura 3.10: Ralo sifônico instalado na cobertura.

3.1.8 Tubagem de drenagem de água

As tubagens de drenagem da instalação são todas em material plástico transparente (modelo Geberit 56 x 3) (Figura 3.11). Este tipo de material permite uma instalação fácil e rápida, ao mesmo tempo que segura e durável, através de uniões por eletrossoldadura ou soldadura topo a topo. Por serem transparentes, permitem observar e melhor compreender os fenómenos a ocorrer no interior das tubagens aquando do escoamento. A instalação experimental encontra-se esquematizada na Figura 3.12.



Figura 3.11: Tubagem de plástico transparente da instalação experimental.

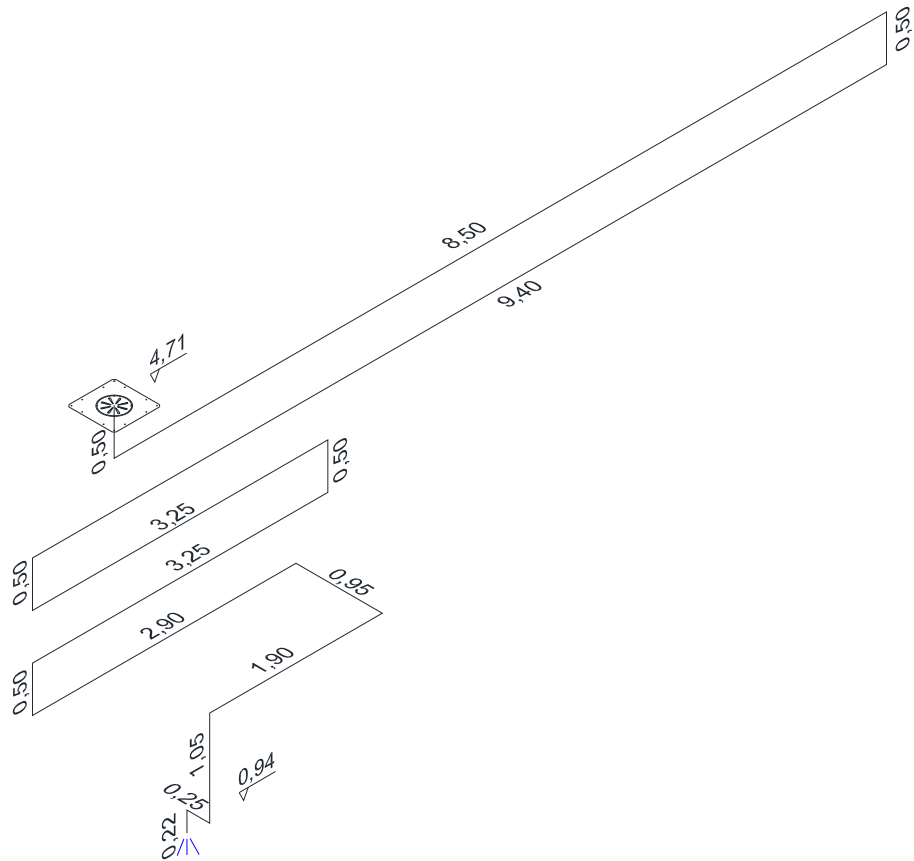


Figura 3.12: Esquema altimétrico da instalação experimental com marcação dos comprimentos de cada trecho da tubagem (dimensões em metros).

Na Tabela 3.3 apresenta-se o dimensionamento hidráulico efetuado pelo fabricante para as tubagens do sistema de drenagem.

Tabela 3.3: Características técnicas do dimensionamento efetuado pelo fabricante para as tubagens de drenagem (Geberit Tecnologia Sanitária, 2005b).

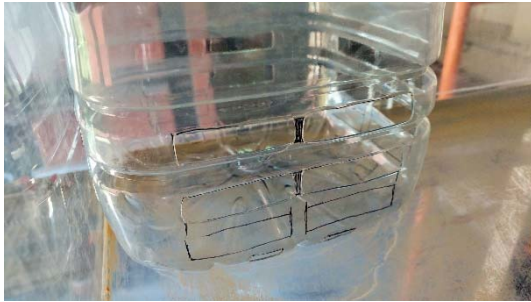
Característica	Valor
Caudal de cálculo (l/s)	3,00
Carga hidráulica (m)	3,60
Inclinação (%)	0,0
K , coeficiente de Manning-Strickler ($m^{1/3}/s$)	110
Diâmetro de cálculo (mm)	35,0
Diâmetro adotado (mm)	56
Percentagem de enchimento (%)	95
V , velocidade de escoamento (m/s)	1,60

3.2 Alterações introduzidas à instalação experimental

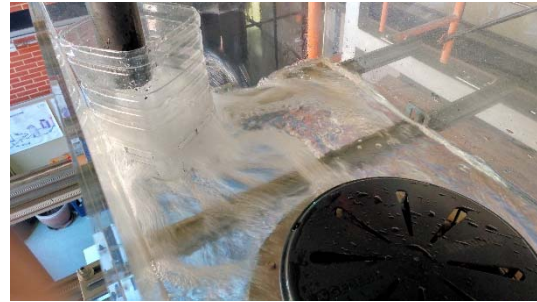
Com o objetivo de se reduzirem erros de leitura ou diminuir a incerteza experimental, foram introduzidas algumas alterações à constituição inicial da instalação experimental. Tal permitiu desenvolver melhor o trabalho pretendido.

3.2.1 Dispositivo de uniformização da alimentação da água

A caixa acrílica da cobertura é alimentada por um tubo de grande diâmetro e caudal debitado, que causa bastante turbulência na superfície livre da água. Por forma a reduzir esta ondulação, foi instalado à saída do tubo um garrafão de água de 5 litros, com vários cortes laterais (Figura 3.13-a). Tal permite que a água debitada se espalhe uniformemente e em camadas, em toda a área da base do garrafão, tal como demonstrado na Figura 3.13-b.



a) Cortes laterais no garrafão para permitir a passagem da água

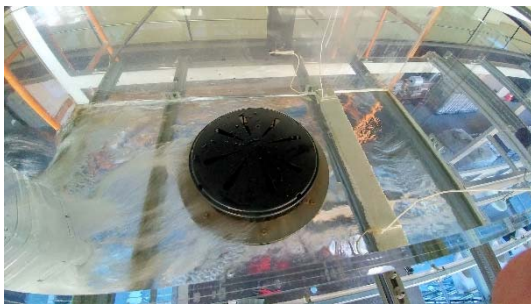


b) Sistema em funcionamento

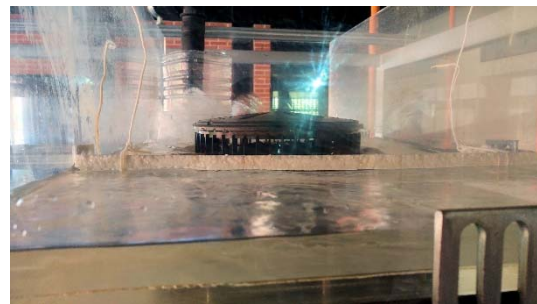
Figura 3.13: Dispositivo de uniformização da alimentação de água na cobertura.

3.2.2 Placa de nivelamento da superfície livre de água na cobertura

Por forma a minimizar as ondas propagadas na superfície livre de água na cobertura e assim se obter leituras mais rigorosas, instalou-se uma placa de nivelamento em esferovite. Esta solução simples, baseada no Princípio dos Vasos Comunicantes, assegura que a altura da água nos dois lados da régua seja a mesma. Assim, consegue-se minimizar ou mesmo atenuar as ondas produzidas pela entrada de água na cobertura. Observa-se na Figura 3.14-a, à esquerda da régua de nivelamento, uma superfície bastante turbulenta e agitada; à direita da régua, a superfície livre é bastante mais nivelada e quase plana. Na Figura 3.14-b vê-se a superfície livre de água quase plana, com o sistema em funcionamento.



a) Vista superior. À esquerda da régua de nivelamento a superfície da água apresenta-se com bastante turbulência



b) Pormenor da superfície livre de água sem turbulência. Em plano de fundo, o tubo de alimentação com bastante turbulência.

Figura 3.14: Régua de nivelamento da superfície livre de água na cobertura.

3.3 Colmatação do ralo sifónico

Objetivo principal deste trabalho, a colmatação do ralo sifónico assume grande importância. Foi necessário encontrar uma forma de colmatação que fosse eficaz a conter a entrada de água no ralo sifónico, mas ao mesmo tempo fácil de colocar e retirar. Houve um grande número de ensaios com percentagens de colmatação distintas e, portanto, procurou-se uma forma de colmatação que se adaptasse facilmente ao que era pretendido.

3.3.1 Colmatação lateral

Escolheu-se como material de colmatação lateral o poliestireno extrudido em forma de rolo para pavimento flutuante com 3 mm de espessura (Figura 3.15). Este apresenta como vantagens a facilidade de se moldar no formato pretendido, a facilidade em colocar e retirar, a total impermeabilidade à água e a não necessidade de utilização de ferramentas, colas ou vedantes para se poder aplicar. Desta forma, ensaiaram-se várias percentagens de colmatação do ralo sifónico que simulavam o entupimento por detritos ou outros objetos.



Figura 3.15: Poliestireno extrudido em forma de rolo (retirado de www.leroymerlin.pt a 20-10-2016).

Na Figura 3.16 mostra-se a aplicação do poliestireno extrudido aplicado como colmatação lateral do ralo sifónico.



a) Ralo sífónico colmatado lateralmente



b) Pormenor da colmatação lateral

Figura 3.16: Colmatação lateral do ralo sífónico.

3.3.2 Colmatação no topo

A colmatação no topo do ralo sífónico foi feita recorrendo a fita adesiva de embalar (Figura 3.17-a). As vantagens na utilização desta forma de colmatação no topo são a facilidade de colocar e retirar, a total impermeabilidade à passagem de água, a não necessidade de ferramentas para aplicar e não descolar com a água. É visível na Figura 3.17-b o ralo sífónico parcialmente colmatado no topo, com a fita adesiva a tapar algumas das aberturas.

a) Fita adesiva de embalar (retirado de www.leroymerlin.pt a 20-10-2016)

b) Pormenor da colmatação no topo, com aberturas colmatadas e não colmatadas

Figura 3.17: Colmatação no topo do ralo sífónico.

3.4 Equipamento experimental

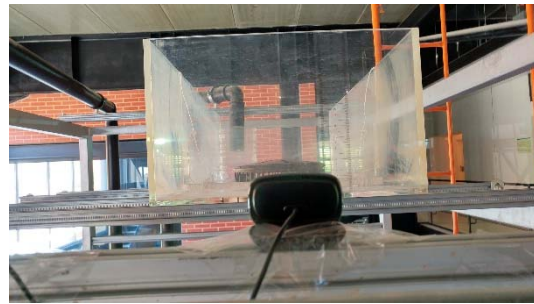
3.4.1 Equipamento de captação de imagem

Para se efetuar o registo fotográfico das alturas e escoamento de água no interior do depósito de água da cobertura foi utilizada uma câmara web de alta definição ligada a um computador, modelo Logitech HD Webcam C525 (Figura 3.18-a). Esta câmara foi mantida numa posição

fixa relativamente ao depósito de água da cobertura, desde o início até à conclusão de todos os ensaios realizados (Figura 3.18-b).



a) Câmara web usada na captação de imagens



b) Posição da câmara web relativamente ao depósito de água

Figura 3.18: Equipamento de captação de imagem.

A captura das imagens foi feita recorrendo ao *software* Webcam Timelapse (Figura 3.19). Este permite captar imagens de forma contínua e em intervalos de tempo definidos pelo utilizador. Estas imagens são posteriormente visualizadas por forma a serem obtidas as alturas de água.

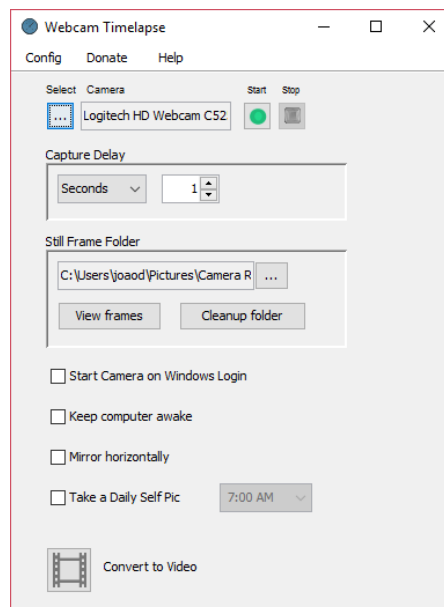


Figura 3.19: *Software* de captação de imagem.

Na execução deste *software* seleciona-se a câmara e a resolução de imagem a usar. Escolheu-se a resolução de captura máxima permitida pela câmara web, que é de 1 600 x 896 pixéis. O intervalo de captura sequencial ficou definido como 1 segundo entre cada fotografia.

3.4.2 Equipamento de medição da altura de água

A medição das alturas de água foi efetuada com uma fita métrica instalada na face exterior do depósito da cobertura. Na Figura 3.20 mostra-se a posição da fita métrica no depósito de água. Para atenuação de erros, a fita métrica encontra-se graduada de ambos os lados sendo que a leitura usada em cada imagem é a média das leituras de cada lado.

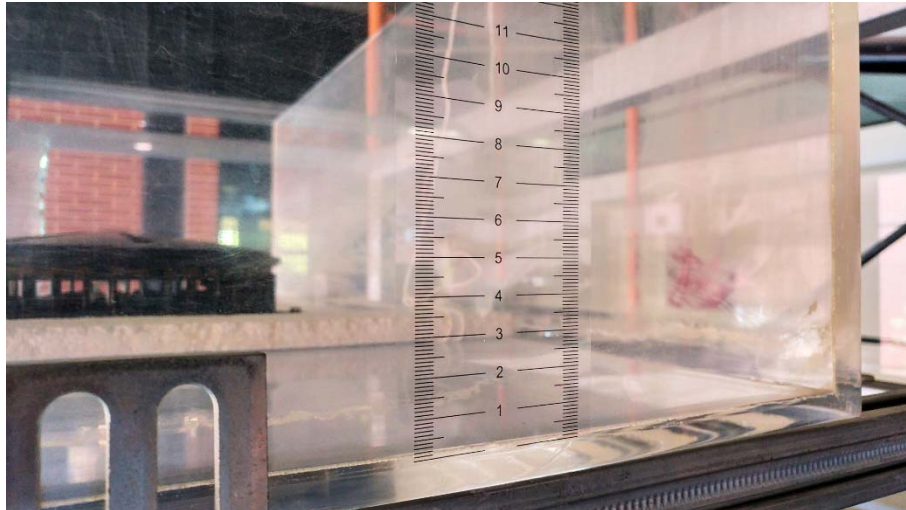


Figura 3.20: Fita métrica de medição das alturas de água.

3.5 Condições experimentais

3.5.1 Caudal de dimensionamento

Como ponto de partida para todos os ensaios a realizar neste trabalho, foi necessário determinar experimentalmente o caudal de escoamento máximo permitido pelo ralo sifónico e pela tubagem de drenagem. Este é o caudal em que a altura de água no depósito se mantém constante. Acima deste caudal, a altura de água no depósito começa lentamente a subir. Na Tabela 3.3 encontra-se o valor de 3,00 l/s apresentado pelo fabricante da instalação experimental como o valor do caudal de dimensionamento do ralo sifónico.

A Tabela 3.4 apresenta os fenómenos a observar na tubagem de drenagem da instalação experimental, para diferentes caudais.

Tabela 3.4: Fenómenos a observar na instalação experimental para diferentes frequências de funcionamento da bomba e caudal debitado, conforme indicado pelo fabricante (Geberit Tecnologia Sanitária, 2005b).

Frequência (Hz)	Caudal (l/s)	Fenómeno a observar
30	2,40	O escoamento processa-se por gravidade em regime turbulento rugoso, por acumulação de água.
38	3,00	Existe uma transição do escoamento do regime gravítico para o regime sifónico. Este fenómeno é visível a partir de jusante. A lâmina líquida no depósito da cobertura não excede os 4 cm.
42	3,50	O sistema deixa de ter capacidade para escoar o caudal solicitado e a lâmina de água no depósito da cobertura começa lentamente a subir.

No entanto houve a necessidade de determinar experimentalmente o valor indicado pelo fabricante. Para tal, a instalação experimental foi colocada em funcionamento durante 10 minutos, aumentando progressivamente o caudal fornecido pela bomba e sendo observada a altura de água no depósito da cobertura. Os três valores de caudal mais elevados encontram-se na Figura 3.21.

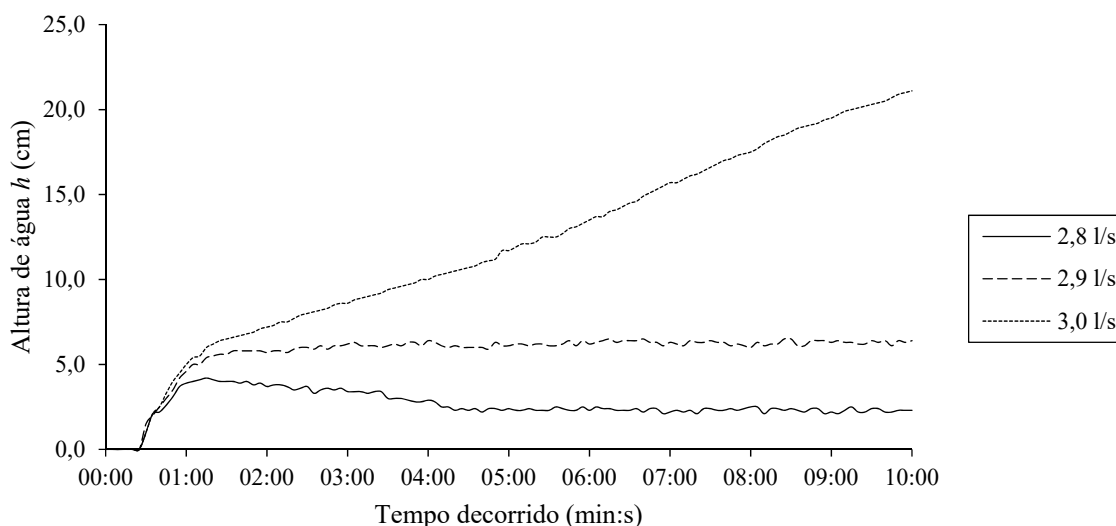


Figura 3.21: Determinação experimental do caudal de dimensionamento do sistema sifónico.

Observa-se que o valor do caudal máximo de escoamento do sistema sifónico Q_0 é de 2,9 l/s. Este é o último valor de caudal para o qual a altura de água no depósito se mantém constante ao longo do tempo. No valor de caudal imediatamente a seguir, 3,0 l/s, a altura de água já começa a subir lentamente até encher o depósito. Está desta forma determinado o valor máximo de escoamento Q_0 que irá ser usado doravante como referência nos ensaios.

Observa-se que o caudal de dimensionamento Q_0 do sistema sifónico instalado, obtido por via experimental, é de 2,9 l/s. Um caudal 3,45% mais baixo que valor de 3,00 l/s indicado pelo fabricante. Esta diferença pode dever-se a erros do caudalímetro ou imperfeições do ralo instalado.

3.5.2 Caudais a ensaiar

Estando já determinado o caudal máximo de escoamento Q_0 do sistema sifónico, escolheu-se de seguida as variações deste caudal que iriam ser ensaiados.

Assim, adotaram-se os valores de $0,8 \times Q_0$, Q_0 , $1,2 \times Q_0$ e $1,4 \times Q_0$ a que correspondem os caudais da Tabela 3.5. A Figura 3.22 mostra a evolução temporal dos caudais até ao instante a partir do qual se mantêm constantes. Assim, foram efetuados pequenos ajustes na frequência de funcionamento da bomba por forma ao caudal debitado se manter constante até ao final dos ensaios.

Tabela 3.5: Caudais ensaiados.

Valor	Caudal (l/s)
$0,8 \times Q_0$	2,3
Q_0	2,9
$1,2 \times Q_0$	3,5
$1,4 \times Q_0$	4,1

A bomba só atinge o caudal de ensaio 5 a 10 segundos após se definir a frequência correspondente no controlador. Tal deve-se ao facto de haver um atraso a atingir o caudal desejado após se definir a frequência de funcionamento do controlador da bomba de água. Este fenómeno ocorre para todos os caudais ensaiados.

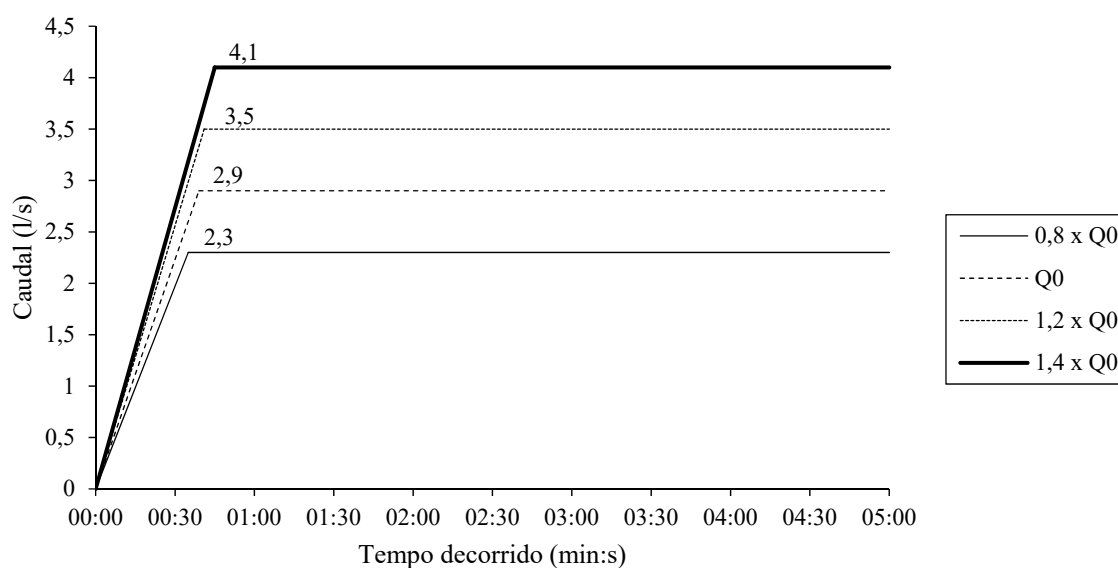


Figura 3.22: Evolução temporal dos caudais ensaiados.

3.5.3 Forma da colmatação lateral do ralo sifónico

Antes de se realizarem os ensaios foi necessário decidir a forma da colmatação lateral a usar. Inicialmente, para uma mesma percentagem de colmatação, testaram-se três formas possíveis, esquematizadas na Figura 3.23. Assim, no exemplo apresentado, para a mesma percentagem de 50% de colmatação, testaram-se as combinações de 50% contínuo, de 25% + 25% e de 12,5% × 4. De notar que as três formas apresentam uma colmatação lateral total de 50%, apenas difere a forma como esta é distribuída no perímetro do ralo sifónico.

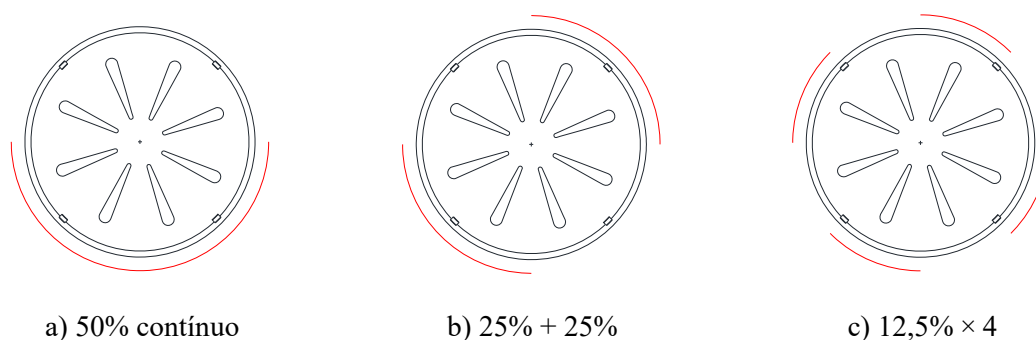


Figura 3.23: Forma da colmatação lateral do ralo sifónico (vista superior).

Colocou-se a instalação experimental em funcionamento com o caudal Q_0 e registaram-se os valores das alturas de água no depósito de água da cobertura para as três combinações de

colmatação lateral. Analisando a Figura 3.24, observa-se que a linha da colmatação de 50% se encontra entre as linhas de 25% + 25% e de 12,5% x 4.

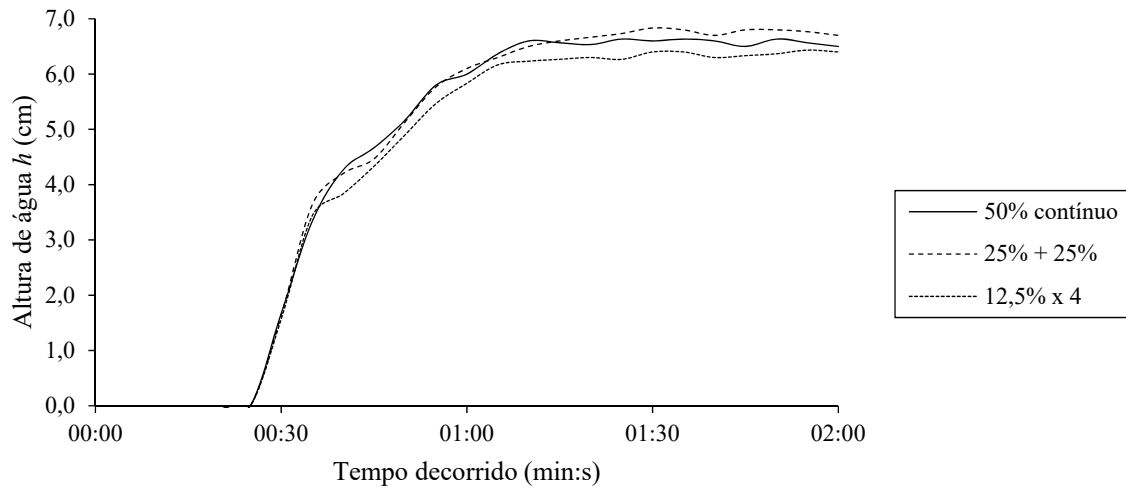


Figura 3.24: Ensaio das formas da colmatação lateral do ralo sifônico.

Adicionalmente, foi realizada no *software* SPSS uma análise estatística onde se verificou que não existem diferenças significativas entre os valores médios das três formas de colmatação (Figura 3.25).

Hypothesis Test Summary

	Null Hypothesis	Test	Sig.	Decision
1	The distribution of médias colmatação is the same across categories of % colmatação.	Independent-Samples Kruskal-Wallis Test	,251	Retain the null hypothesis.

Asymptotic significances are displayed. The significance level is ,05.

Figura 3.25: Teste de Kruskal-Wallis realizado aos valores médios das três formas de colmatação.

Com os testes realizados ficou assim determinado que não existem diferenças significativas entre as formas de colmatação lateral usadas pelo que, nos ensaios seguintes, será a forma contínua ao longo do perímetro do ralo sifônico.

3.5.4 Escolha da duração de cada ensaio

Foi necessário estabelecer uma duração para os ensaios a realizar. A duração escolhida foi de 5 minutos para cada ensaio. Este período de tempo permite a estabilização do caudal descarregado no depósito da cobertura e a observação dos fenómenos desejados.

3.5.5 Curvas de aceleração da bomba

Antes de se dar início à atividade experimental, houve necessidade de definir as curvas de aceleração da bomba. Estas são as curvas que definem o aumento da frequência de funcionamento da bomba em função do tempo. Devido à falta de equipamento automático especializado para o efeito, o arranque e controlo da bomba teve de ser feito manualmente.

É acionada a bomba no instante de tempo inicial e aumenta-se no controlador 1 hertz a cada segundo. Assim a bomba tem um aumento linear e constante da frequência até ao valor definido para os caudais em ensaio.

3.5.6 Colmatação do ralo sifónico

Decidiu-se ensaiar percentagens de colmatação lateral de 10% em 10%, desde 0% a 100%. Adicionalmente, para melhor se poder analisar alguns comportamentos e refinar as conclusões a retirar, ensaiaram-se percentagens de colmatação lateral de 85%, 92,5%, 95% e 97,5%. No topo do ralo sifónico, as 8 aberturas foram sendo tapadas acompanhando a colmatação lateral. O resumo das colmatações efetuadas encontra-se esquematizado na Figura 3.26.

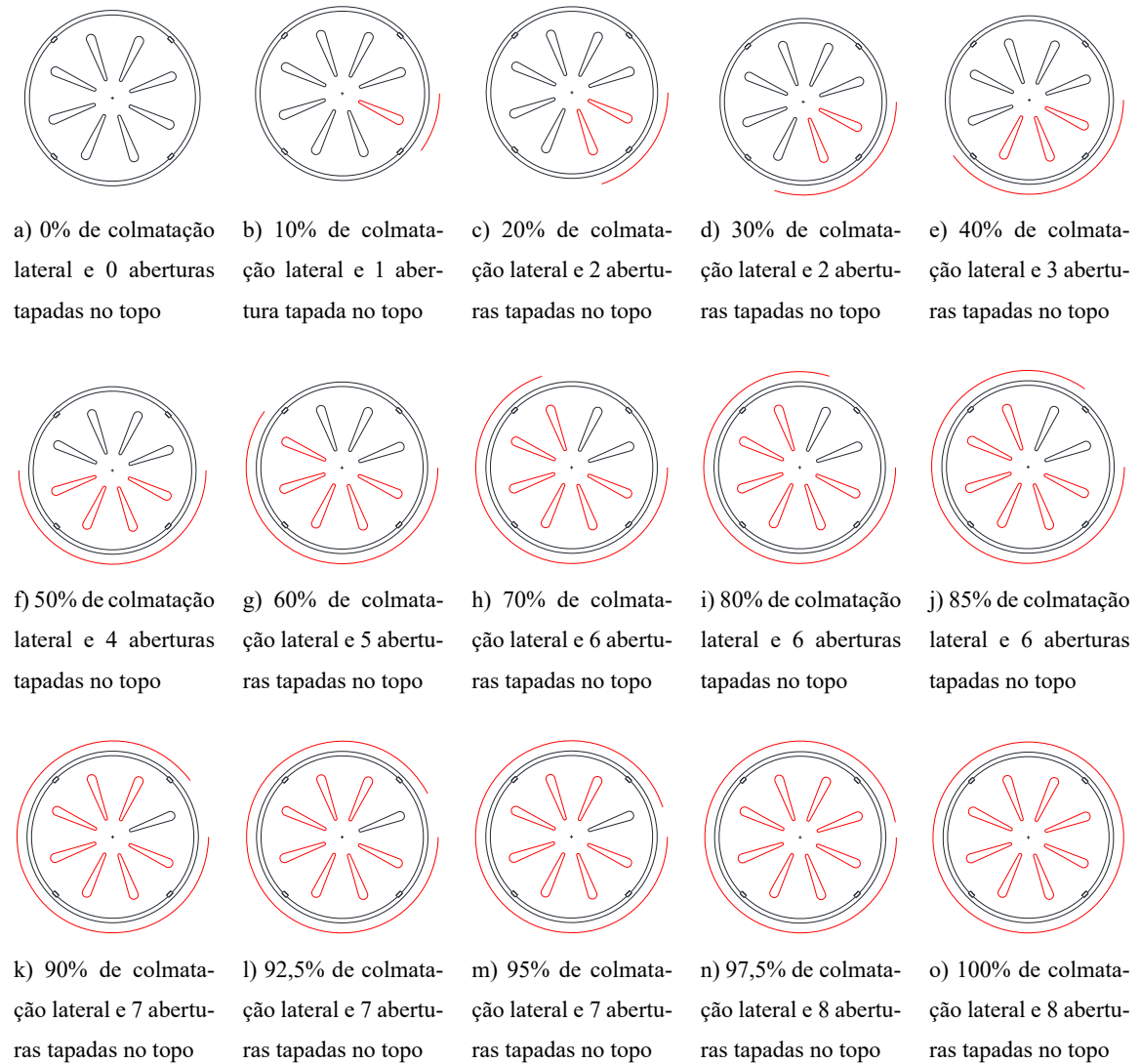


Figura 3.26: Representação esquemática das percentagens de colmatação efetuadas no ralo sífônico (vista superior).

3.5.7 Ensaios realizados

Após as condições experimentais estarem todas reunidas, procedeu-se à realização dos ensaios experimentais. Todos eles foram repetidos 3 vezes por forma a reduzir o erro e a incerteza experimental associada.

Optou-se por realizar três séries de ensaios. A primeira série com o ralo sífônico colmatado lateralmente e no topo. Uma segunda série de ensaios com o ralo sífônico colmatado apenas lateralmente. A terceira e última série de ensaios efetuou-se ao ralo colmatado apenas no

topo. Estas séries de ensaios serão realizadas para todos os caudais já indicados na Tabela 3.5.

3.6 Metodologia experimental

Descreve-se de seguida a metodologia experimental desenvolvida e adotada para a realização de toda a atividade experimental deste trabalho.

Fez-se o registo fotográfico dos ensaios recorrendo a uma câmara web para posterior análise e obtenção das alturas de água dentro do depósito da cobertura. Este registo foi efetuado à taxa de uma imagem a cada segundo. No entanto, devido ao enorme volume de ficheiros produzido, o posterior tratamento das imagens obtidas foi efetuado de 5 em 5 segundos.

Previamente ao início de toda a atividade experimental houve necessidade de definir a forma e o tipo de colmatação, os caudais a serem ensaiados e a duração do ensaio.

Antes de se dar início ao ensaio, verifica-se que não há água presente no depósito da cobertura. Se houver, é forçada a sua saída pelo ralo. Garante-se assim que todos os ensaios têm o mesmo volume de água inicial no depósito da cobertura. De seguida é colmatado o ralo sifónico de acordo com a percentagem em ensaio. Segue-se o início do registo fotográfico sincronizado com o acionamento da bomba de água. A frequência de funcionamento da bomba é aumentada ao ritmo de 1 hertz por segundo, até se atingir o valor definido para o caudal em ensaio. São efetuados pequenos ajustes na frequência de funcionamento da bomba por forma a manter constante o caudal debitado. A bomba é mantida em funcionamento até se atingir a duração de 5 minutos ou até a altura de água estar prestes a atingir o topo do depósito da cobertura sem, no entanto, transbordar. Após se desligar o funcionamento da bomba, é terminado o registo fotográfico e procede-se à análise das imagens obtidas.

3.7 Incerteza experimental

Como é natural em trabalhos experimentais, existe sempre erro e incerteza experimental associados. De seguida descrevem-se e quantificam-se esses valores.

A incerteza experimental relativa à altura de água no depósito da cobertura deve-se ao facto desta ter sido obtida mediante a utilização de uma fita métrica. Contribui igualmente o efeito de capilaridade da água nas paredes do depósito da cobertura e também a posição do observador relativamente à altura de água.

A incerteza experimental relativa na determinação do tempo deve-se ao facto da sincronia no início da captura de fotografias ser efetuada manualmente.

A incerteza experimental do caudal debitado pela bomba, que é medida pelo caudalímetro eletromagnético e conversor de sinal, é de 0,3% do valor medido + 1 mm/s (KROHNE, 2013).

Capitulo 4

RESULTADOS EXPERIMENTAIS

4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo, apresentam-se os resultados experimentais do trabalho obtidos no âmbito dos ensaios realizados com colmatção lateral e no topo (secção 4.1), com colmatção lateral (secção 4.2) e com colmatção apenas no topo (secção 4.3).

A secção 4.4 apresenta os resultados de ensaios realizados em diferentes datas, por forma a se verificar a repetibilidade dos ensaios experimentais.

Importa salientar que só após 28 a 29 segundos do início dos ensaios se verifica a saída de água pelo tubo de alimentação no topo da cobertura. Este fenómeno decorre do facto que a cota geométrica da saída do tubo de alimentação só é vencida pela altura de elevação da bomba de água apenas para uma frequência de funcionamento superior ou igual a 28 ou 29 hertz. Assim, apenas começam a haver registo de alturas de água após o período de tempo indicado em cima.

Cada linha presente nos gráficos das figuras corresponde à média aritmética simples efetuada a 3 ensaios, para cada percentagem de colmatção.

Adicionalmente, assinalaram-se nos gráficos duas linhas a traço ponto. A primeira na cor vermelha representa a altura h das aberturas no topo do ralo sifónico. A segunda, com a cor preta, marca a altura h da saída do tubo de alimentação de água.

Nos gráficos apresentados, as leituras da altura de água que se encontram dentro da zona de caudal variável devem ser ignoradas ou então interpretadas com especial precaução. Nesse intervalo de tempo o caudal ainda está em crescimento e estão a ocorrer vários fenómenos em simultâneo que afetam a qualidade das leituras. Assim, as informações e conclusões retiradas dos ensaios só deverão ser retiradas dentro da zona assinalada de caudal constante.

4.1 Ensaios com colmatção lateral e no topo

Os ensaios nesta secção foram realizados com o ralo sifónico colmatado lateralmente e no topo, para os quatro caudais em estudo: $0,8 \times Q_0$, Q_0 , $1,2 \times Q_0$ e $1,4 \times Q_0$. O visionamento das imagens captadas permitiu, posteriormente, a obtenção das alturas de água no depósito da cobertura.

As percentagens de colmatação efetuadas nesta série de ensaios apresentam-se na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Colmatações efetuadas nos ensaios com colmatação lateral e no topo.

Colmatação do ralo sifónico	Designação
0% de colmatação lateral e 0 aberturas tapadas no topo	sem colmatação
10% de colmatação lateral e 1 abertura tapada no topo	10% lateral + 1 topo
20% de colmatação lateral e 2 aberturas tapadas no topo	20% lateral + 2 topo
30% de colmatação lateral e 2 aberturas tapadas no topo	30% lateral + 2 topo
40% de colmatação lateral e 3 aberturas tapadas no topo	40% lateral + 3 topo
50% de colmatação lateral e 4 aberturas tapadas no topo	50% lateral + 4 topo
60% de colmatação lateral e 5 aberturas tapadas no topo	60% lateral + 5 topo
70% de colmatação lateral e 6 aberturas tapadas no topo	70% lateral + 6 topo
80% de colmatação lateral e 6 aberturas tapadas no topo	80% lateral + 6 topo
85% de colmatação lateral e 6 aberturas tapadas no topo	85% lateral + 6 topo
90% de colmatação lateral e 7 aberturas tapadas no topo	90% lateral + 7 topo
92,5% de colmatação lateral e 7 aberturas tapadas no topo	92,5% lateral + 7 topo
95% de colmatação lateral e 7 aberturas tapadas no topo	95% lateral + 7 topo
97,5% de colmatação lateral e 8 aberturas tapadas no topo	97,5% lateral + 8 topo
100% de colmatação lateral e 8 aberturas tapadas no topo	100% lateral + 8 topo

Nos gráficos apresentados nesta secção, a linha da colmatação de 100% lateral + 8 topo corresponde à vedação quase total da saída de água pelo ralo. Alguma água acaba por ser escoada pelo ralo pois a vedação total não é atingida. Contudo, esse volume de água é reduzido e insignificante comparativamente ao caudal de alimentação. Devido a limitações na instalação experimental não foi possível efetuar a medição desse volume. Implicaria a destruição parcial da tubagem de drenagem de forma a se colocar o equipamento de medição do volume escoado. A mesma explicação aplica-se aos restantes caudais ensaiados.

4.1.1 Caudal $0,8 \times Q_0$

Os resultados das alturas de água no depósito da cobertura para as várias percentagens de colmatção efetuadas para o caudal $0,8 \times Q_0$, obtidos pelo visionamento das imagens e sua posterior análise, encontram-se na Figura 4.1.

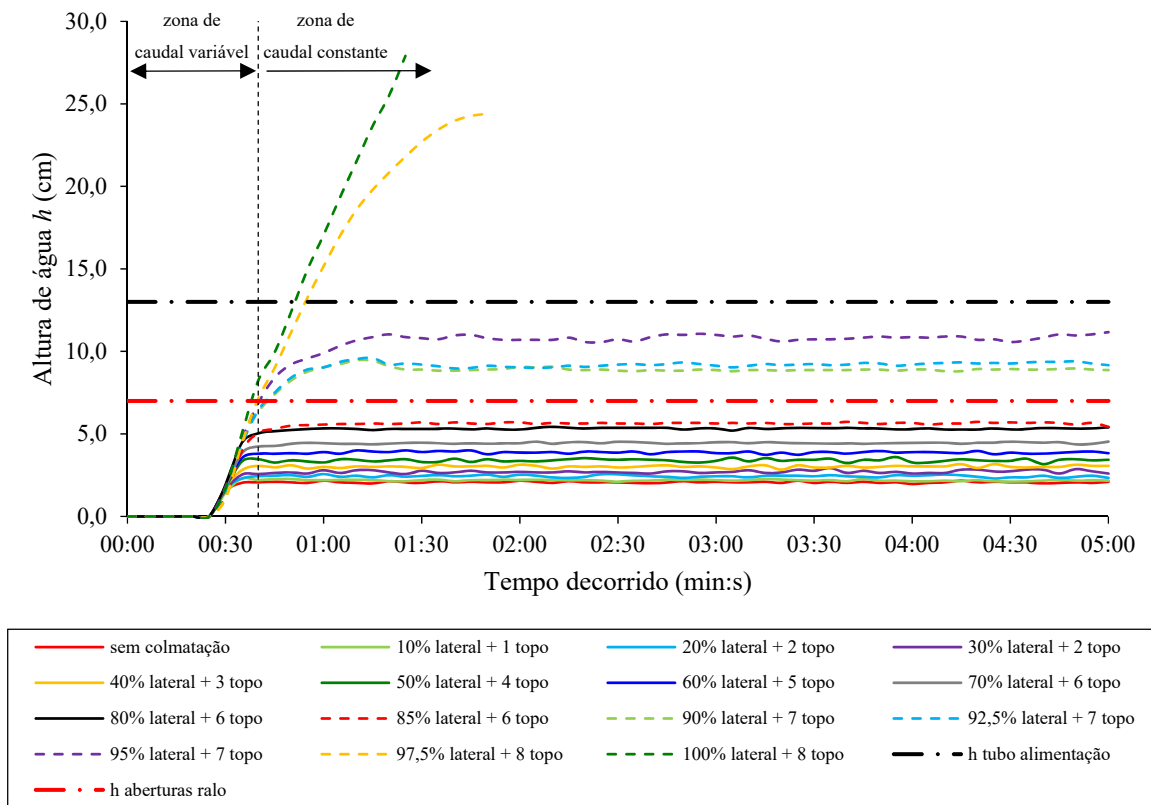


Figura 4.1: Alturas de água para o caudal $0,8 \times Q_0$ com colmatção lateral e no topo.

Nos ensaios, o período máximo de funcionamento da bomba foi de 5 minutos, exceto para a colmatção de 100% lateral + 8 topo, em que esse valor foi de apenas 01:25 minutos e para a colmatção de 97,5% lateral + 8 topo em que terminou aos 01:50 minutos.

A altura de água sem colmatção do ralo sifónico, ronda os 2,1 cm. Através de uma primeira leitura do gráfico da Figura 4.1, observam-se dois grupos de linhas de altura de água e mais duas linhas com comportamento diferente em relação às demais. O primeiro grupo de linhas encontra-se abaixo da altura h das aberturas no topo do ralo sifónico e o segundo grupo encontra-se acima dessa mesma altura. Demonstra que poderá haver uma influência das aberturas do ralo na altura de água no depósito da cobertura.

No primeiro grupo, as alturas de água mantêm uma altura praticamente constante ao longo de cada linha (declive praticamente nulo), mas são gradualmente mais altas com o aumento da percentagem de colmatação, desde a de 10% lateral + 1 topo até à de 85% lateral + 6 topo que apresenta uma altura média de 5,7 cm.

No segundo grupo, que compreende as colmatações de 90% + 7 topo até à de 95% + 7 topo, observa-se um salto nas alturas de água em relação ao grupo anterior. Mantêm o seu comportamento de altura constante (declive praticamente nulo) ao longo de cada linha. A linha mais elevada neste grupo apresenta uma altura média de 10,8 cm.

As linhas da colmatação de 97,5% + 8 topo e de 100% lateral + 8 topo apresentam um comportamento distinto de todas as anteriores. A linha de 97,5% + 8 topo apresenta declive positivo até aos 01:50 minutos onde atinge uma altura máxima de 24,3 cm. A linha de 100% lateral + 8 topo cresce com declive bastante acentuado até aos 01:25 minutos com a altura final de 27,9 cm.

Por observação no local, no final dos ensaios o escoamento não se dá em secção cheia para todas colmatações efetuadas. Possivelmente deve-se a dois motivos. Primeiro, as alturas de água lidas não submergem, na grande maioria das percentagens de colmatação, a zona lateral de entrada de água do ralo sifónico, o que impede a entrada do sistema em pressão e conseqüente formação do efeito sifónico. Segundo, para alturas de água mais elevadas, pelo facto de estas serem devidas às elevadas percentagens de colmatação, também não ocorre o escoamento em secção cheia e formação do efeito sifónico.

4.1.2 Caudal Q_0

O gráfico da Figura 4.2 expõe os resultados das alturas de água no depósito da cobertura para as várias percentagens de colmatação efetuadas para o caudal Q_0 , obtidos pelo visionamento das imagens e sua posterior análise.

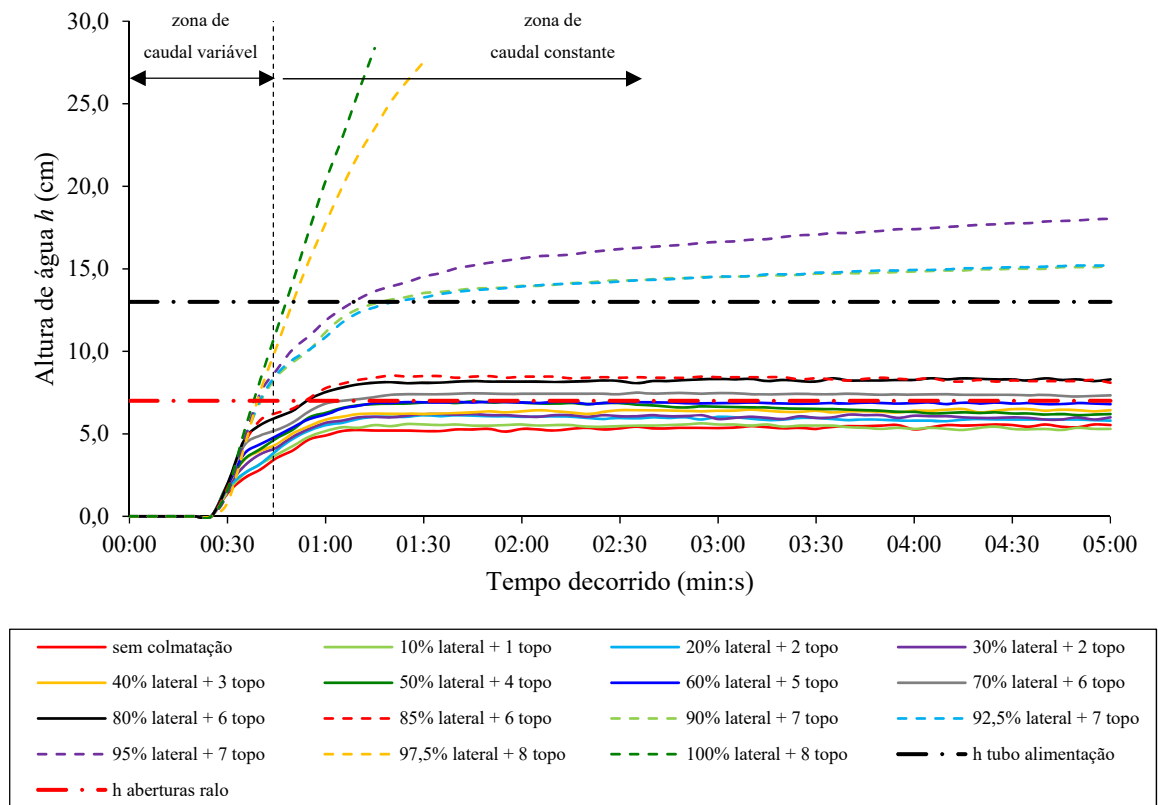


Figura 4.2: Alturas de água para o caudal Q_0 com colmatção lateral e no topo.

Para os ensaios realizados ao caudal Q_0 , o período de funcionamento da bomba de água foi, no máximo, de 5 minutos, exceto para as colmatções de 97,5% lateral + 8 topo e de 100% lateral + 8 topo, para as quais a duração máxima dos ensaios foi de apenas 01:30 e 01:15 minutos, respetivamente.

Para este caudal Q_0 e sem colmatção do ralo sífónico, a altura média de água é de 5,4 cm. Tal como para o caudal $0,8 \times Q_0$, da Figura 4.2 observam-se dois grupos de linhas de altura de água e mais duas linhas com comportamento diferente das restantes.

No primeiro grupo, observa-se que as alturas de água são praticamente constantes (declive quase nulo) ao longo de cada linha, mas são gradualmente mais altas com o aumento da percentagem de colmatção, desde a de 10% lateral + 1 topo até à de 85% lateral + 6 topo, com a altura média de 8,3 cm.

No segundo grupo que engloba as colmatções de 90% + 7 topo até 95% + 7 topo, atinge-se uma altura final máxima de 18,0 cm e observa-se um salto nas alturas de água, mas alterando o seu comportamento em relação ao grupo anterior. Deixam de apresentar altura constante

ao longo dos ensaios e passam a exibir um crescimento com declive constante. As linhas de colmatação 90% + 7 topo e 92,5% + 7 topo são quase indistinguíveis entre si.

A partir dos 13 cm de altura de água observa-se uma alteração no declive de crescimento das linhas. Passam a exibir um menor declive de crescimento. A possível explicação para esta mudança poderá vir do facto da superfície livre da água atingir a altura h da saída do tubo de alimentação, marcada no gráfico da Figura 4.2 com a linha a traço ponto de cor preta. Nesse instante, ocorre um reajustamento manual da frequência de funcionamento da bomba por forma ao caudal debitado ser mantido constante. Esta mesma possível explicação aplica-se aos restantes caudais ensaiados em que ocorra uma alteração no declive de crescimento das linhas na mesma altura h indicada.

Por último, nas linhas da colmatação de 97,5% + 8 topo e de 100% lateral + 8 topo, observa-se um comportamento distinto de todas as anteriores. A linha de 97,5% + 8 topo cresce quase linearmente até aos 01:30 minutos onde atinge a altura final máxima de 27,5 cm. A linha de 100% lateral + 8 topo cresce linearmente até aos 01:15 minutos com a altura final de 28,4 cm.

As alturas de água lidas submergem, na sua maioria, a zona lateral de entrada de água do ralo sifónico. Isto reúne as condições para que se possa atingir o efeito sifónico com o sistema em pressão e escoamento em secção cheia. No entanto há que ter em consideração a percentagem de colmatação aplicada. Ao ser bastante elevada vai impedir a formação do efeito sifónico. Assim, apenas para colmatações superiores ou iguais a 95% + 7 topo é que o efeito sifónico não se desenvolve, devido à percentagem de colmatação presente. Neste último caso, o escoamento dá-se em secção cheia mas com imensa elevação de ar nas tubagens.

Para as linhas de colmatação abaixo de 92,5% lateral + 7 topo inclusive, nota-se uma perturbação no declive das linhas por volta do instante de 00:45 minutos. Aqui, o sistema possivelmente terá entrado em pressão. O efeito sifónico desenvolve-se e as alturas de água deixam de aumentar momentaneamente. Ocorre a alteração do declive de crescimento das alturas de água no instante do desenvolvimento do efeito sifónico.

4.1.3 Caudal $1,2 \times Q_0$

A Figura 4.3 exibe os resultados das alturas de água no depósito da cobertura para as várias percentagens de colmatção efetuadas para o caudal $1,2 \times Q_0$, obtidos pelo visionamento das imagens e sua posterior análise.

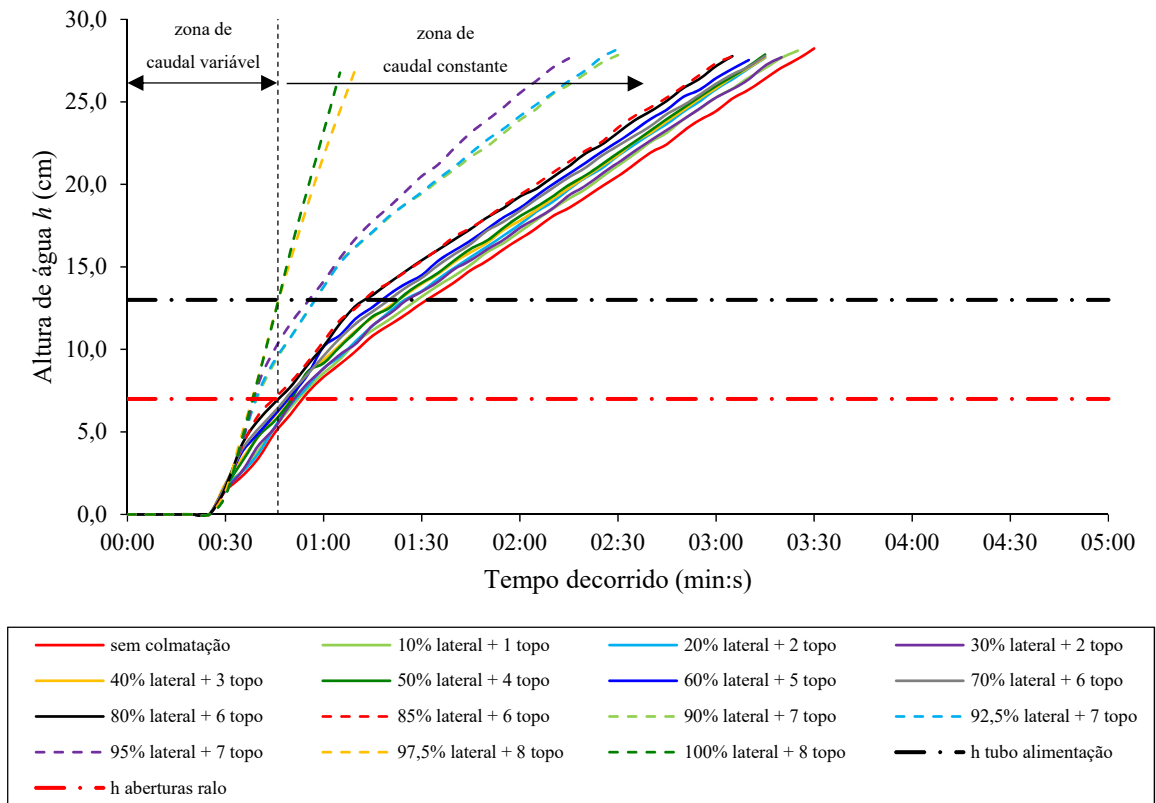


Figura 4.3: Alturas de água para o caudal $1,2 \times Q_0$ com colmatção lateral e no topo.

Para o caudal em estudo, o período máximo de funcionamento da bomba de água foi de 03:25 minutos.

Por observação da Figura 4.3 e tal como sucedeu para os dois anteriores caudais, o caudal $1,2 \times Q_0$ em estudo também exibe dois grupos de linhas de altura de água e mais duas linhas com comportamento distinto das restantes.

No primeiro grupo observa-se que as alturas de água seguem um crescimento com declive constante ao longo de cada linha. As linhas são gradualmente mais elevadas com o aumento da percentagem de colmatção, desde a de 10% lateral + 1 topo até à de 85% lateral + 6 topo, em que esta atinge a altura final máxima de 27,8 cm para o instante 03:05 minutos.

No segundo grupo de linhas, que abarca as colmatações de 90% + 7 topo até à de 95% + 7 topo, observa-se um salto nas alturas de água em relação ao grupo de linhas anterior. Mantém-se um crescimento com declive semelhante ao grupo anterior. As linhas da colmatação de 90% + 7 topo e 92,5% + 7 topo apresentam um comportamento semelhante e são quase indistinguíveis.

Após a passagem da linha da altura h do tubo de alimentação observa-se uma alteração no declive de algumas linhas de percentagem de colmatação mais elevada. A possível explicação para este fenómeno é a mesma já descrita para o caudal Q_0 .

As linhas da colmatação de 97,5% + 8 topo e de 100% lateral + 8 topo demonstram um crescimento com declive distinto de todas as anteriores. A linha de 97,5% + 8 topo cresce quase linearmente até aos 01:10 minutos, com a altura final máxima de 27,1 cm. A linha de 100% lateral + 8 topo cresce linearmente até aos 01:05 minutos, com a altura final de 26,8 cm.

As alturas de água lidas submergem, na totalidade dos ensaios realizados, a zona lateral de entrada de água do ralo sifónico. Isto reúne as condições para que se possa atingir o efeito sifónico com o sistema em pressão e escoamento em secção cheia. No entanto há que ter em consideração a percentagem de colmatação aplicada. Ao ser bastante elevada vai impedir a formação do efeito sifónico. Assim, apenas para colmatações superiores ou iguais a 90% + 7 topo é que o efeito sifónico não se desenvolve, devido à percentagem de colmatação presente. Neste último caso, o escoamento dá-se em secção cheia, mas com entrada de ar nas tubagens.

Para as linhas de colmatação abaixo de 85% + 6 topo inclusive, nota-se uma perturbação no declive das linhas por volta do período 00:45 a 01:00 minutos. Neste período, o sistema provavelmente terá entrado em pressão e sido desenvolvido o efeito sifónico. As alturas de água deixam de aumentar momentaneamente. A alteração do declive de crescimento das alturas de água ocorre no instante do desenvolvimento do efeito sifónico.

4.1.4 Caudal $1,4 \times Q_0$

A Figura 4.4 apresenta os resultados das alturas de água no depósito da cobertura para as várias percentagens de colmatção efetuadas para o caudal $1,4 \times Q_0$, obtidos pelo visionamento das imagens e sua posterior análise.

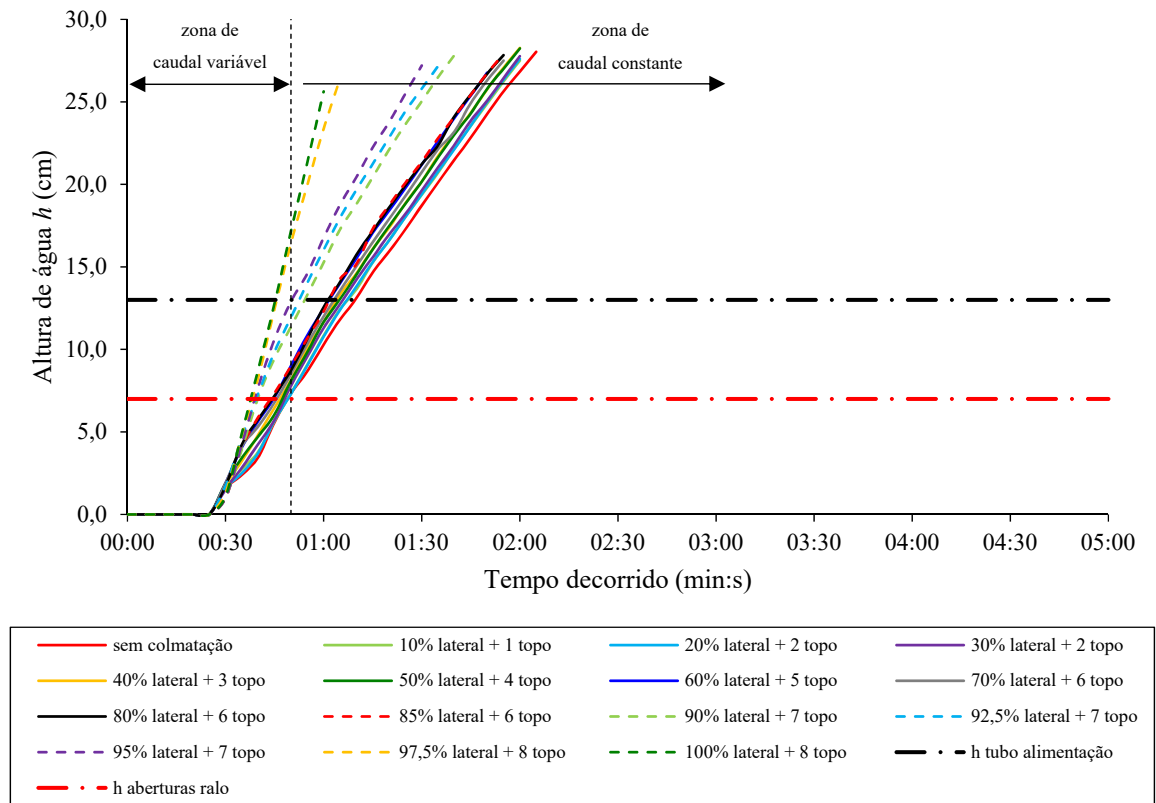


Figura 4.4: Alturas de água para o caudal $1,4 \times Q_0$ com colmatção lateral e no topo.

No caudal em estudo, o período máximo de funcionamento da bomba de água foi de 02:00 minutos.

Numa característica comum com os caudais anteriores, na Figura 4.4 observa-se a presença de dois grupos de linhas de altura de água e mais duas linhas com comportamento distinto das restantes. O comportamento das linhas deste caudal é em tudo semelhante ao caudal $1,2 \times Q_0$, com a diferença do declive de crescimento ser bastante mais acentuado.

O primeiro grupo, compreendido entre as linhas de 10% lateral + 1 topo até à de 85% lateral + 6 topo, apresenta as alturas de água com um crescimento com declive constante ao longo de cada linha. As linhas são gradualmente maiores com o aumento da percentagem de

colmatação, desde a de 10% lateral + 1 topo até à de 85% lateral + 6 topo cuja altura final máxima é de 27,9 cm para o instante 01:55 minutos.

No segundo grupo de linhas, que aglomera as colmatações de 90% + 7 topo até à de 95% + 7 topo, observa-se um salto nas alturas de água. As três linhas de colmatação apresentam um comportamento semelhante entre si, apenas diferindo ligeiramente no declive de crescimento.

As linhas da colmatação de 97,5% + 8 topo e de 100% lateral + 8 topo demonstram um crescimento com declive distinto das anteriores. A linha de 97,5% + 8 topo cresce quase linearmente até aos 01:05 minutos, com a altura final máxima de 26,4cm. A linha de 100% lateral + 8 topo cresce linearmente até aos 01:00 minutos, com a altura final de 25,6 cm.

As alturas de água lidas submergem, na totalidade dos ensaios realizados, a zona lateral de entrada de água do ralo sifónico. Isto reúne as condições para que se possa atingir o efeito sifónico com o sistema em pressão e escoamento em secção cheia. No entanto há que ter em consideração a percentagem de colmatação aplicada. Ao ser bastante elevada vai impedir a formação do efeito sifónico. Este não se desenvolve apenas para colmatações superiores ou iguais a 90% + 7 topo, devido à percentagem de colmatação presente. Neste último caso, o escoamento dá-se em secção cheia, mas com entrada de ar nas tubagens.

Nas linhas de colmatação abaixo de 85% + 6 topo, inclusive, nota-se uma ligeira perturbação no declive das linhas por volta do período 00:45 a 00:50 minutos. Neste período, o sistema entra em pressão, o efeito sifónico desenvolve-se e as alturas de água deixam de aumentar momentaneamente. A alteração do declive de crescimento das alturas de água ocorre no instante do desenvolvimento do efeito sifónico. Contudo, a entrada em efeito sifónico dá-se na zona de crescimento de caudal. Logo, não é possível tecer conclusões sobre a entrada em efeito sifónico a caudal constante, como realizado nos caudais anteriores.

4.2 Ensaios com colmatação lateral

Nesta secção os ensaios foram realizados com o ralo sifónico colmatado apenas lateralmente, para os quatro caudais em estudo: $0,8 \times Q_0$, Q_0 , $1,2 \times Q_0$ e $1,4 \times Q_0$. O visionamento das imagens captadas permitiu, posteriormente, a obtenção das alturas de água no depósito da cobertura.

A não colmatação das aberturas no topo do ralo sifónico permite a entrada e escoamento de água mesmo após a colmatação de todo o perímetro lateral.

As percentagens de colmatação efetuadas para esta série de ensaios apresentam-se na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Colmatações efetuadas nos ensaios com colmatação lateral.

Colmatação do ralo sifónico	Designação
0% de colmatação lateral	sem colmatação
10% de colmatação lateral	10% lateral
20% de colmatação lateral	20% lateral
30% de colmatação lateral	30% lateral
40% de colmatação lateral	40% lateral
50% de colmatação lateral	50% lateral
60% de colmatação lateral	60% lateral
70% de colmatação lateral	70% lateral
80% de colmatação lateral	80% lateral
85% de colmatação lateral	85% lateral
90% de colmatação lateral	90% lateral
92,5% de colmatação lateral	92,5% lateral
95% de colmatação lateral	95% lateral
97,5% de colmatação lateral	97,5% lateral
100% de colmatação lateral	100% lateral

4.2.1 Caudal $0,8 \times Q_0$

Os resultados das alturas de água no depósito da cobertura para as várias percentagens de colmatação lateral efetuadas para o caudal $0,8 \times Q_0$, obtidos pelo visionamento das imagens e sua posterior análise, encontram-se na Figura 4.5.

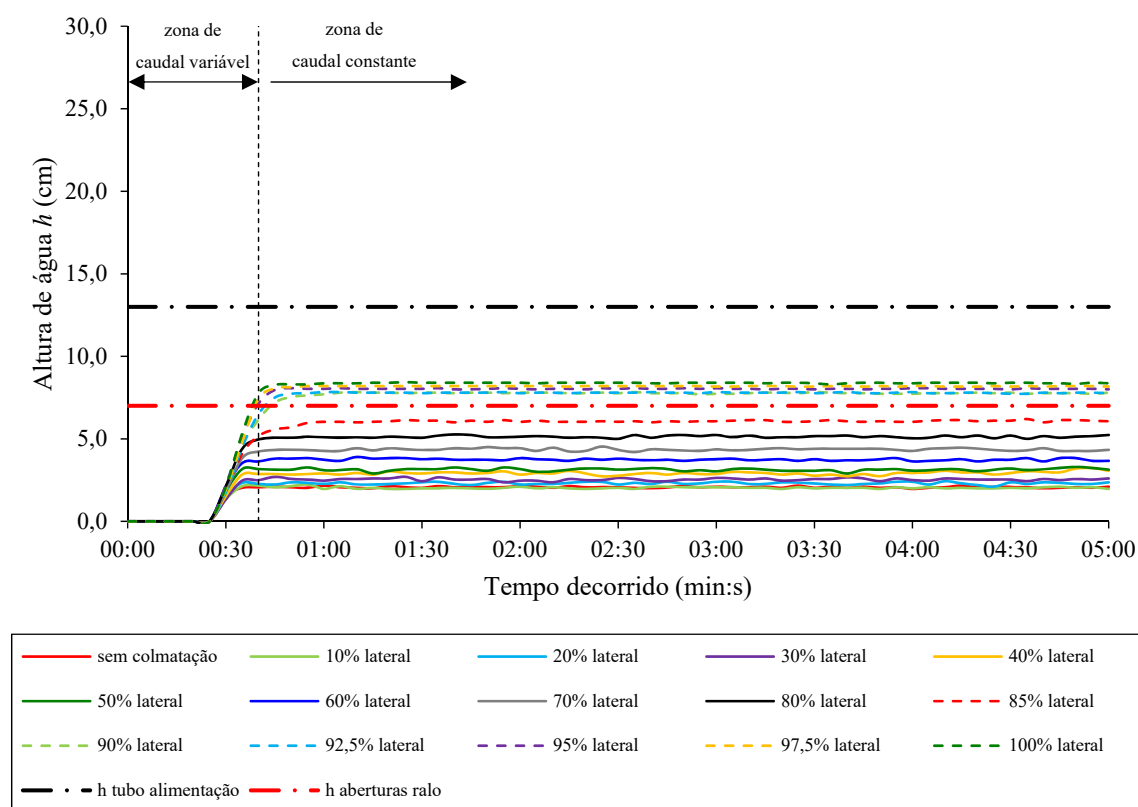


Figura 4.5: Alturas de água para o caudal $0,8 \times Q_0$ com colmatação lateral.

Contrariamente ao que sucede no mesmo caudal para a colmatação lateral + topo, o período de funcionamento da bomba de água atingiu a duração máxima de 5 minutos para todos os ensaios sem exceção. Tal deixa antever a influência que a não colmatação no topo do ralo sifónico poderá ter no desempenho do escoamento.

A altura de água sem colmatação do ralo sifónico, ronda os 2,1 cm. Diferente do que se observou para a colmatação lateral + topo, na Figura 4.5 observam-se apenas dois grupos de linhas de altura de água: o primeiro, da colmatação 10% lateral à 85% lateral e o segundo da colmatação 90% lateral à 100% lateral.

A divisão dos grupos dá-se pela linha da altura h das aberturas no topo do ralo sifónico. Por si só, esta observação não permite nenhuma conclusão imediata, no entanto será usada na secção 4.4 como forma de comprovar a repetibilidade dos ensaios. Para todas as situações em que não atinja esse valor, o ensaio foi considerado igual ao de colmatação lateral + topo. Assim só serão analisadas e discutidas no capítulo 5 as linhas de altura de água acima das aberturas no topo do ralo sifónico.

No primeiro grupo, as alturas de água mantêm uma altura constante (declive quase nulo) ao longo de cada linha, mas são gradualmente maiores com o aumento da percentagem de colmatação, desde a de 10% lateral até à de 85% lateral que atinge a altura média final de 6,1 cm. Este grupo situa-se abaixo da linha da altura h das aberturas no topo do ralo sifónico.

No segundo grupo, contendo as colmatações de 90% até à de 100% lateral, observa-se um salto nas alturas de água em relação ao grupo anterior. A altura média final máxima é de 8,4 cm e mantêm-se o comportamento de altura constante (declive nulo) ao longo de cada linha. As linhas apresentam-se bastante mais próximas entre si, em relação às do primeiro grupo. Este grupo situa-se acima da linha da altura h das aberturas no topo do ralo sifónico.

As alturas de água lidas não submergem, na sua grande maioria, a zona lateral de entrada de água do ralo sifónico. As que submergem, não permitem a entrada em pressão do sistema e a formação do efeito sifónico, devido à entrada de ar no sistema pelas aberturas no topo do ralo sifónico.

Por observação no local durante os ensaios, o sistema não entra em pressão e o efeito sifónico não se desenvolve. No final dos ensaios o escoamento chega a atingir secção cheia, mas com elevada entrada de ar nas tubagens, em formas de bolhas assinaladas na Figura 4.6. Ocorre a formação de vórtices no decorrer dos ensaios.

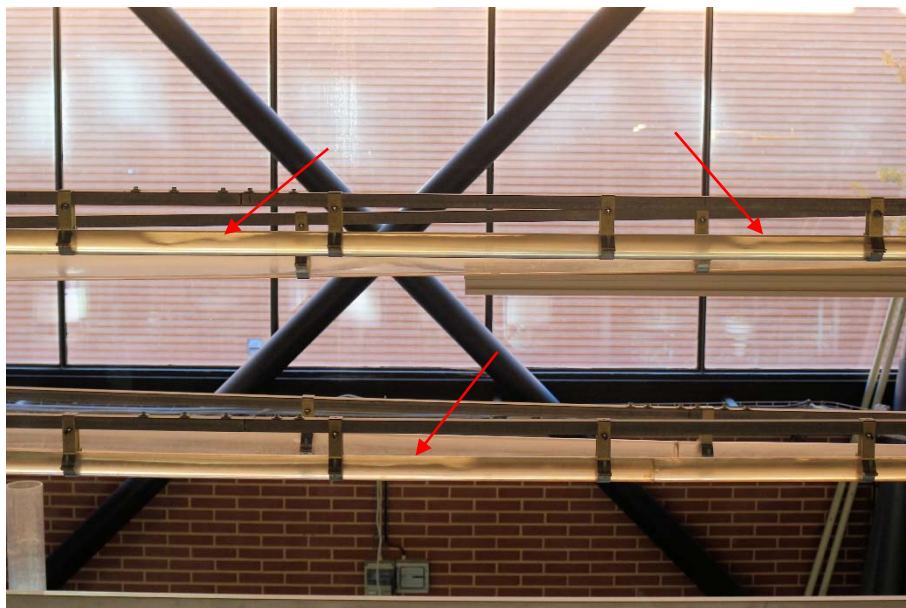


Figura 4.6: Formação de bolhas de ar observadas num ensaio com caudal $0,8 \times Q_0$.

4.2.2 Caudal Q_0

Os resultados das alturas de água no depósito da cobertura para as várias percentagens de colmatação lateral efetuadas para o caudal Q_0 , obtidos pelo visionamento das imagens e sua posterior análise, encontram-se na Figura 4.7.

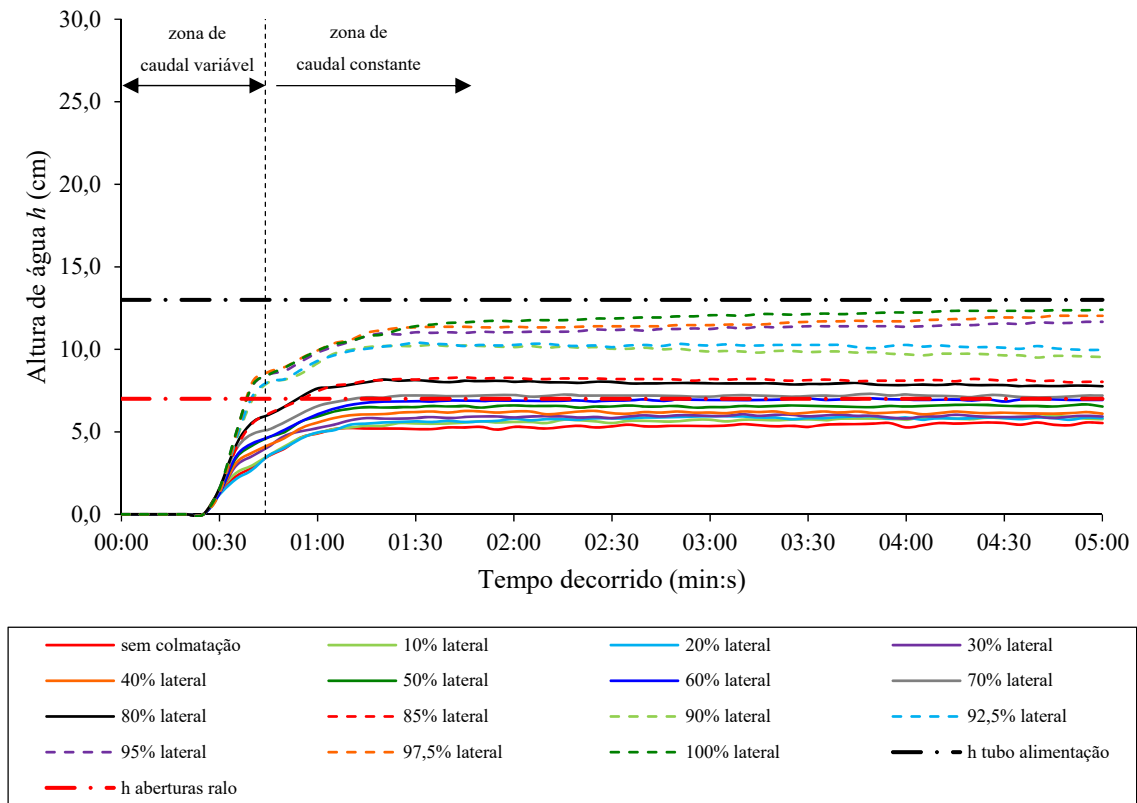


Figura 4.7: Alturas de água para o caudal Q_0 com colmatação lateral.

O período de funcionamento da bomba atingiu a duração máxima de 5 minutos para todos os ensaios realizados ao caudal Q_0 . Com uma breve observação notam-se diferenças claras nas alturas de água para o mesmo caudal na colmatação lateral + topo da Figura 4.2.

A Figura 4.7 permite observar três grupos de linhas de altura de água: o primeiro, englobando as colmatações desde 10% lateral a 85% lateral; o segundo, com as colmatações de 90% lateral e de 92,5% lateral e, por fim, o terceiro grupo as colmatações de 95% lateral até 100% lateral.

No primeiro grupo, observa-se que as alturas de água mantêm uma altura praticamente constante (declive nulo) ao longo de cada linha, mas são gradualmente maiores com o aumento da percentagem de colmatação, desde a de 10% lateral até à de 85% lateral com a altura média final de 8,0 cm.

No segundo grupo, que engloba as colmatações 90% lateral e de 92,5% lateral cuja altura média final é de 10,0 cm, observa-se um salto nas alturas de água, mas alterando o

comportamento em relação ao grupo anterior. Deixam de apresentar altura constante ao longo dos ensaios e passam a exibir um ligeiro declive decrescente.

No último grupo, nas colmatações de 95% lateral a 100% lateral, observa-se um comportamento distinto das anteriores. As linhas apresentam declive ligeiramente positivo, até se atingir a altura final máxima de 12,4 cm na colmatação de 100% lateral.

As alturas de água lidas submergem, na sua maioria, a zona lateral de entrada de água do ralo sifónico. Isto reúne as condições para que se possa atingir o efeito sifónico com o sistema em pressão e escoamento em secção cheia. No entanto há que ter em consideração a percentagem de colmatação aplicada. Ao ser bastante elevada vai impedir a formação do efeito sifónico. Assim, apenas para colmatações superiores ou iguais a 95% lateral é que o efeito sifónico não se desenvolve, devido à percentagem de colmatação presente e à entrada de ar no sistema pelas aberturas no topo do ralo sifónico. Nestas percentagens de colmatação elevada, o escoamento chega a atingir secção cheia no final dos ensaios, mas com bastante entrada de ar nas tubagens, em formas de bolhas.

Para colmatações elevadas, ocorre a formação de vórtices. Isto é um sinal indicativo de que apesar de o ralo se encontrar completamente submerso, o sistema não entrou em pressão e o efeito sifónico não se desenvolveu. É devido ao escoamento ocorrer através das aberturas no topo do ralo em vez das entradas laterais. Este fenómeno está demonstrado na Figura 4.8, onde estão assinalados dois vórtices.



Figura 4.8: Vórtices visíveis no caudal Q_0 com colmatação de 95% lateral.

Por volta do instante de 00:45 minutos, ocorre uma perturbação no declive em algumas das linhas. Neste instante, o sistema terá provavelmente entrado em pressão, o efeito sifônico desenvolvido e as alturas de água deixam de aumentar momentaneamente. A alteração do declive de crescimento das alturas de água ocorre no instante do desenvolvimento do efeito sifônico.

4.2.3 Caudal $1,2 \times Q_0$

Relativamente ao caudal $1,2 \times Q_0$, os resultados das alturas de água no depósito da cobertura para as várias percentagens de colmatação lateral efetuadas, obtidos pelo visionamento das imagens e sua posterior análise, encontram-se na Figura 4.9.

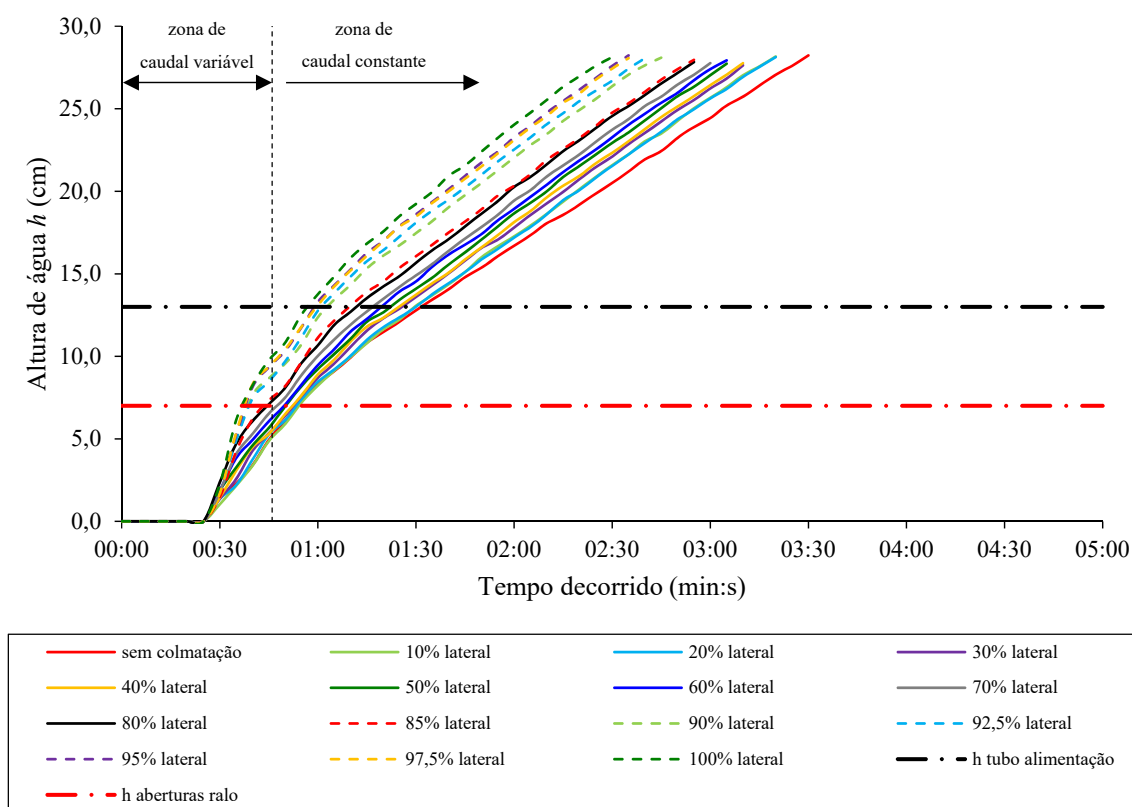


Figura 4.9: Alturas de água para o caudal $1,2 \times Q_0$ com colmatação lateral.

No caudal em estudo, o período de funcionamento da bomba atingiu a duração máxima de 03:20 minutos. Sem qualquer análise mais detalhada, observam-se diferenças notórias nas alturas de água para o mesmo caudal com colmatação lateral + topo da Figura 4.3.

A Figura 4.9 permite observar dois grupos de linhas de altura de água, com declive de crescimento praticamente igual para todas as linhas: o primeiro, desde a colmatação 10% lateral à de 85% lateral e um segundo, com as colmatações de 90% lateral à de 100% lateral.

No primeiro grupo, observa-se que as alturas de água mantêm um crescimento com declive positivo e praticamente constante ao longo de cada linha, mas são gradualmente maiores com o aumento da percentagem de colmatação, desde a de 10% lateral até à de 85% lateral.

No segundo grupo, que engloba as colmatações 90% lateral à de 100% lateral, observa-se um salto nas alturas de água em relação ao grupo anterior. Exibem um declive de crescimento quase igual ao das linhas do grupo anterior.

Tal como ocorreu no caudal anterior, as alturas de água lidas submergem, na sua maioria, a zona lateral de entrada de água do ralo sifónico. Reúne-se assim as condições para que se possa atingir o efeito sifónico com o sistema em pressão e escoamento em secção cheia. No entanto há que ter em consideração a percentagem de colmatção aplicada. Ao ser bastante elevada vai impedir a formação do efeito sifónico. Assim, apenas para colmatções superiores ou iguais a 95% lateral é que o efeito sifónico não se desenvolve, devido à elevada percentagem de colmatção presente. Nestas colmatções elevadas, o escoamento ocorre com alternância entre em secção cheia com elevada entrada de ar (Figura 4.10) e entre secção não cheia.



Figura 4.10: Entrada de ar na tubagem de drenagem num ensaio com caudal $1,2 \times Q_0$.

Para colmatções elevadas, ocorre a formação de vórtices. Isto é um sinal indicativo de que, apesar de o ralo se encontrar completamente submerso, o sistema não entrou em pressão e o efeito sifónico não se desenvolveu. Este fenómeno está demonstrado na Figura 4.11, onde são visíveis vórtices em diferentes percentagens de colmatção.



a) Colmatação de 95% lateral



b) Colmatação de 100% lateral

Figura 4.11: Vórtices visíveis no caudal $1,2 \times Q_0$ para elevadas percentagens de colmatação.

Por volta do instante de 00:45 minutos, ocorre uma perturbação no declive das linhas, na transição entre a zona de caudal variável para constante. Então, o sistema provavelmente terá entrado em pressão, o efeito sifônico desenvolveu-se e as alturas de água deixaram de aumentar momentaneamente. A alteração do declive de crescimento das alturas de água ocorre no instante do desenvolvimento do efeito sifônico.

Aos 13 cm de altura de água, observa-se uma alteração no declive das linhas de colmatação igual ou superior a 90% lateral. Deve-se à submersão da saída do tubo de alimentação pela superfície livre da água. Este fenómeno já foi descrito e explicado anteriormente.

4.2.4 Caudal $1,4 \times Q_0$

Os resultados das alturas de água no depósito da cobertura para as várias percentagens de colmatação efetuadas lateral para o caudal $1,4 \times Q_0$, obtidos pelo visionamento das imagens e sua posterior análise, encontram-se na Figura 4.12.

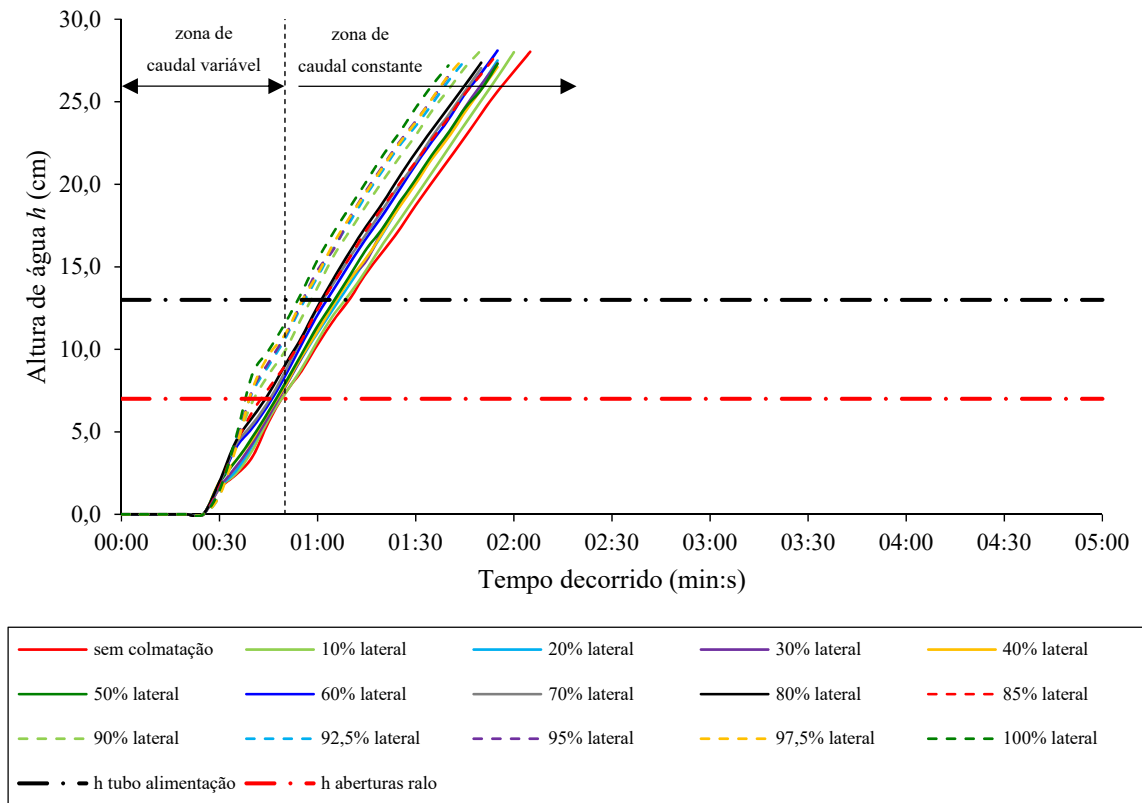


Figura 4.12: Alturas de água para o caudal $1,4 \times Q_0$ com colmatação lateral.

Para o caudal em estudo, o período de funcionamento da bomba atingiu a duração máxima de 02:00 minutos. Com uma primeira observação simples, notam-se diferenças claras nas alturas de água para o mesmo caudal com colmatação lateral + topo da Figura 4.4.

A Figura 4.12 permite observar dois grupos de linhas de altura de água, separados por uma pequena diferença em altura: o primeiro, desde a colmatação 10% lateral à de 85% lateral e o segundo com as colmatações de 90% lateral à de 100% lateral.

No primeiro grupo, observa-se que as alturas de água mantêm um crescimento com declive quase constante ao longo de cada linha, mas são gradualmente maiores com o aumento da percentagem de colmatação, desde a de 10% lateral até à de 85% lateral.

No segundo grupo, que engloba as colmatações 90% lateral à de 100% lateral, observa-se um pequeno salto nas alturas de água em relação ao grupo anterior. Exibem, igualmente, um crescimento com declive constante ao longo do tempo.

Da mesma forma que sucedeu para o caudal anterior, as alturas de água lidas submergem, na sua maioria, a zona lateral de entrada de água do ralo sifónico. Isto permite que se possa formar o efeito sifónico com o sistema em pressão e escoamento em secção cheia. Apenas para colmatações superiores ou iguais a 95% lateral é que o efeito sifónico não se desenvolve, devido à elevada percentagem de colmatação presente. Nestas colmatações elevadas, o escoamento ocorre em secção cheia, mas com elevada entrada de ar na canalização de drenagem (Figura 4.13).



Figura 4.13: Entrada de ar na tubagem de drenagem num ensaio com caudal $1,4 \times Q_0$.

Para percentagens elevadas de colmatação, ocorre a formação de vórtices. Este fenómeno está demonstrado na Figura 4.14 onde é visível um vórtice para uma colmatação de 95% lateral.



Figura 4.14: Vórtice visível no caudal $1,4 \times Q_0$ com colmatação de 95% lateral.

Por volta do instante de 00:45 minutos, ocorre uma perturbação no declive das linhas. A perturbação pode dever-se a dois fatores: entrada do sistema em pressão e desenvolvimento do efeito sifónico ou transição do escoamento em superfície livre para secção cheia. Este fenómeno é mais visível nas linhas de colmatação igual ou superior a 90% lateral.

Contudo, a entrada em efeito sifónico dá-se na zona de crescimento de caudal. Logo, não é possível tecer conclusões sobre a entrada em efeito sifónico a caudal constante, como realizado nos caudais anteriores.

4.3 Ensaios com colmatação no topo

Nesta secção, os ensaios foram realizados com o ralo sifónico colmatado apenas no topo, para os dois caudais mais elevados: $1,2 \times Q_0$ e $1,4 \times Q_0$. Os restantes caudais mais baixos não foram ensaiados, pois qualquer que fosse a colmatação aplicada, a altura de água não atingiria o topo do ralo sifónico e obter-se-iam as mesmas leituras. O visionamento das imagens captadas permitiu, posteriormente, a obtenção das alturas de água no depósito da cobertura.

As colmatações efetuadas para esta série de ensaios apresentam-se na Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Colmatações efetuadas nos ensaios com colmatação no topo.

Colmatação do ralo sifônico	Designação
0 aberturas tapadas no topo	sem colmatação
1 abertura tapada no topo	1 topo
2 aberturas tapadas no topo	2 topo
3 aberturas tapadas no topo	3 topo
4 aberturas tapadas no topo	4 topo
5 aberturas tapadas no topo	5 topo
6 aberturas tapadas no topo	6 topo
7 aberturas tapadas no topo	7 topo
8 aberturas tapadas no topo	8 topo

4.3.1 Caudal $1,2 \times Q_0$

Os resultados das alturas de água no depósito da cobertura para as colmatações efetuadas para o caudal $1,2 \times Q_0$, obtidos pelo visionamento das imagens e sua posterior análise, encontram-se na Figura 4.15.

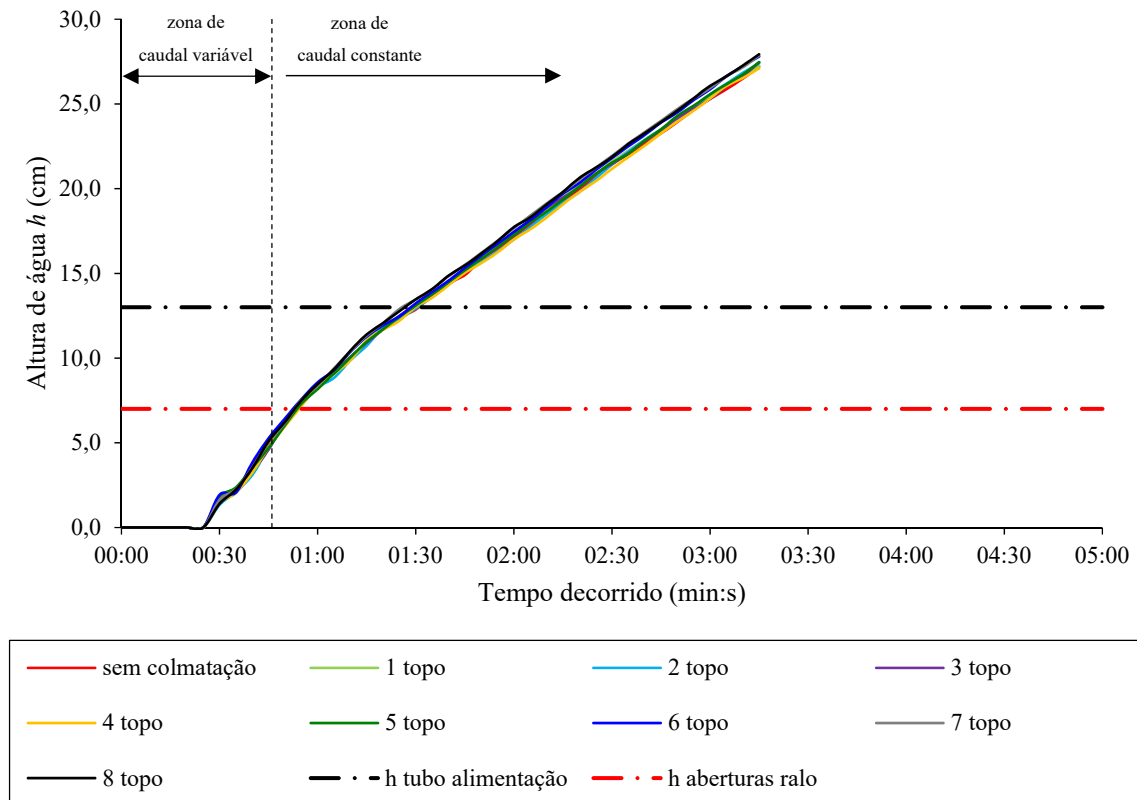


Figura 4.15: Alturas de água para o caudal $1,2 \times Q_0$ com colmatação no topo.

No caudal em estudo, o período de funcionamento da bomba atingiu a duração máxima de 03:15 minutos.

Na Figura 4.15 observa-se que as linhas se encontram bastante próximas, sendo em determinados momentos indistinguíveis entre si. A diferença de altura entre linhas torna-se mais visível a partir de metade da duração do ensaio. No instante final distam apenas 0,8 cm entre si as linhas de maior e de menor altura de água.

As alturas de água lidas submergem, na sua maioria, a zona lateral de entrada de água do ralo sifónico. Isto permitiu a formação do efeito sifónico com o sistema em pressão e escoamento em secção cheia. Por volta do instante de 00:35 minutos, ocorre uma perturbação no declive das linhas. Neste momento, o sistema entra em pressão, o efeito sifónico desenvolve-se e ocorre a alteração do declive de crescimento das alturas de água. O sistema entra em pressão ainda antes da entrada na zona de caudal constante.

4.3.2 Caudal $1,4 \times Q_0$

Os resultados das alturas de água no depósito da cobertura para as colmatações efetuadas para o caudal $1,4 \times Q_0$, obtidos pelo visionamento das imagens e sua posterior análise, encontram-se na Figura 4.16.

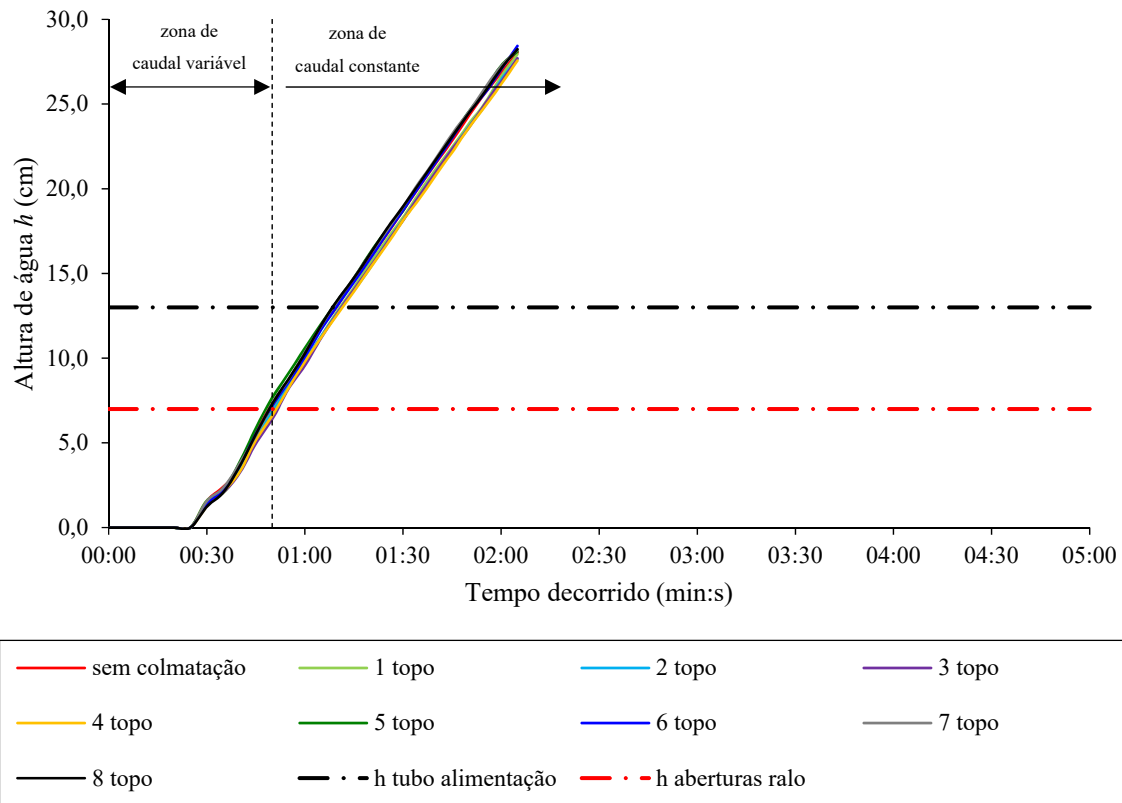


Figura 4.16: Alturas de água para o caudal $1,4 \times Q_0$ com colmatação no topo.

No caudal em estudo, o período de funcionamento da bomba atingiu a duração máxima de 02:05 minutos.

Pela Figura 4.15, observa-se que as linhas se encontram bastante próximas, sendo quase indistinguíveis entre si. Seguem um crescimento com declive praticamente constante desde o instante inicial. No instante final distam 1,3 cm entre si as linhas de maior e de menor altura de água.

Tal como no caudal anterior, as alturas de água lidas submergem, na sua maioria, a zona lateral de entrada de água do ralo sifónico. Isto permite que se forme na plenitude o efeito sifónico com o sistema em pressão e escoamento em secção cheia. Por volta do instante de

00:35 minutos, ocorre uma perturbação no declive das linhas. Aqui, o sistema entra em pressão, o efeito sifónico desenvolve-se e ocorre a alteração do declive de crescimento das alturas de água. A entrada do sistema em efeito sifónico dá-se ainda na zona de caudal variável.

4.4 Repetibilidade dos ensaios experimentais

Como forma de se determinar a repetibilidade dos ensaios experimentais, efetuaram-se leituras para os mesmos caudais em diferentes datas. Desta forma, tem-se uma noção da variabilidade das leituras. Na Figura 4.17, apresentam-se as alturas de água para os vários caudais em estudo, em diferentes datas.

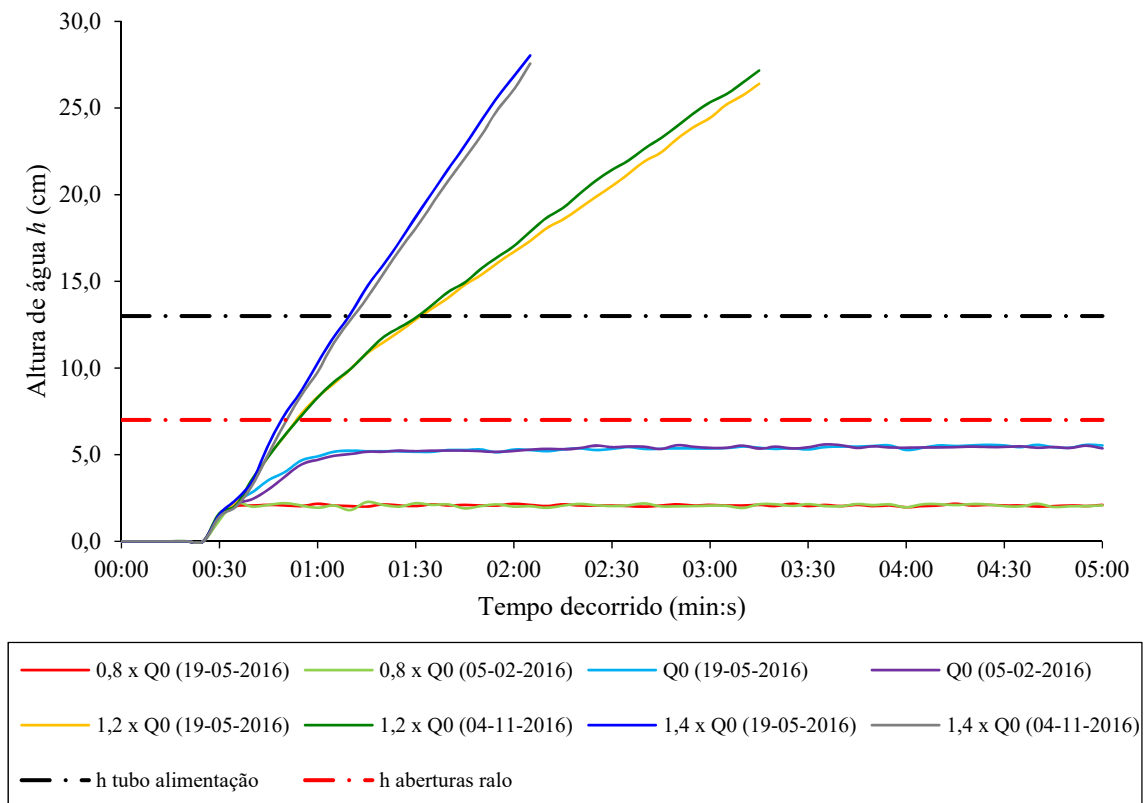


Figura 4.17: Alturas de água para os vários caudais em estudo, sem colmatção.

Pela Figura 4.17, observa-se que os caudais $0,8 \times Q_0$ e Q_0 apresentam linhas bastante mais próximas entre si do que os caudais $1,2 \times Q_0$ e $1,4 \times Q_0$. Estes últimos distam entre si, no instante final, 0,8 e 0,5 cm, respetivamente.

Capítulo 5

ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Neste capítulo faz-se a análise pormenorizada e a discussão dos resultados experimentais obtidos.

5.1 Análise da repetibilidade dos ensaios experimentais

5.1.1 Ensaio sem colmatção

Com os dados das leituras da altura de água sem colmatção efetuadas em duas datas distintas (Figura 4.17), construiu-se o gráfico de diferenças relativas pela expressão 5.1, que se representa na Figura 5.1. Permite assim ter uma noção das diferenças que se verificam entre leituras de datas diferentes.

$$\text{dif. rel. (\%)} = \frac{(h - h_0)}{h_0} \times 100 \quad (5.1)$$

em que:

- h altura de água medida numa data [cm];
- h_0 altura de água medida numa segunda data [cm].

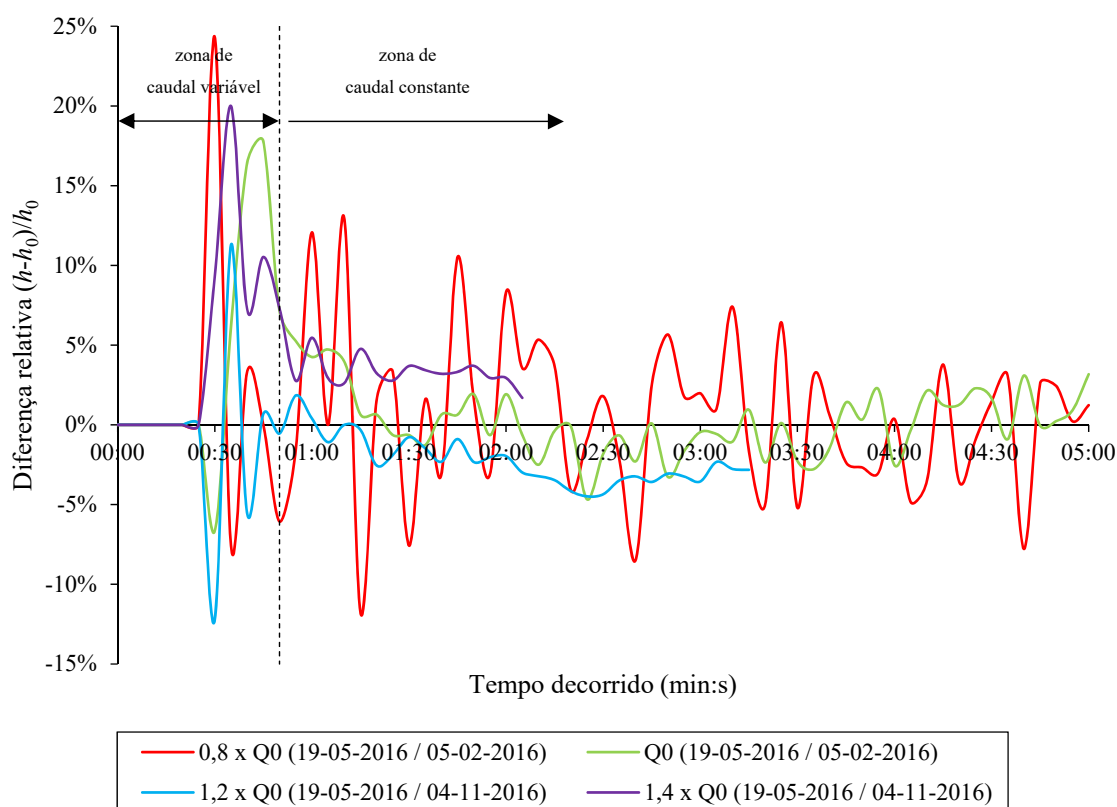


Figura 5.1: Diferenças relativas $(h-h_0)/h_0$ em leituras de água em datas distintas, para os quatro caudais em estudo sem colmatação.

Verifica-se no intervalo de tempo entre os 00:30 e os 01:00 minutos valores mais elevados, para todos os caudais. Ainda se está dentro da zona de caudal variável e neste intervalo ocorre o enchimento do tanque e o arranque do efeito sifônico (nalguns casos apenas). Estes fenómenos provocam a maior variação das leituras. Após este intervalo observa-se que as diferenças relativas baixam em média para valores menores de 5%, com exceção do caudal $0,8 \times Q_0$ que apresenta uma maior amplitude de valores.

O caudal Q_0 apresenta valores positivos e negativos ao longo do tempo, tal como o caudal $0,8 \times Q_0$. O caudal $1,2 \times Q_0$ apresenta valores exclusivamente negativos a partir do instante 01:00 minutos e o caudal $1,4 \times Q_0$ valores exclusivamente positivos. Em resumo, verifica-se que quanto maiores os caudais, menores são as amplitudes das diferenças relativas entre as leituras efetuadas em diferentes datas.

5.1.2 Ensaios com várias percentagens de colmatação lateral

Na Figura 5.2 mostram-se as diferenças relativas da altura de água abaixo das aberturas no topo do ralo sífónico. Os valores dos ensaios para o caudal $0,8 \times Q_0$ e Q_0 com colmatação lateral + topo e colmatação lateral são, na prática, os mesmos ensaios realizados em diferentes dias. A haverem diferenças nas leituras, será devido ao erro experimental associado.

Da análise da figura conclui-se que as diferenças relativas são positivas e em média, inferiores a 10% o que pode ser considerado um erro aceitável. Somente a percentagem de colmatação de 85% apresenta diferenças relativas sempre negativas e também inferiores a 10%. Os valores lidos dentro da zona de caudal variável devem ser ignorados pelas razões já descritas anteriormente.

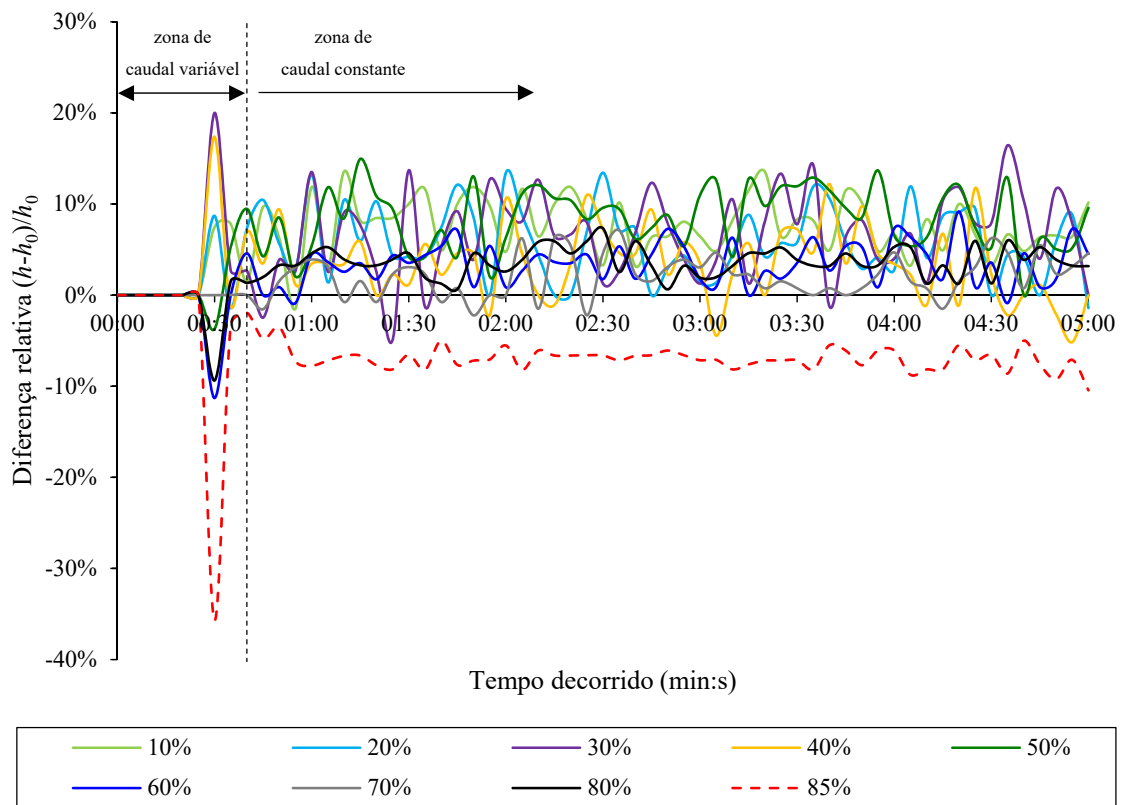


Figura 5.2: Diferenças relativas $(h-h_0)/h_0$ em leituras da altura de água em datas distintas para o caudal $0,8 \times Q_0$ nas percentagens de 10% a 85%.

Outra conclusão importante a se retirar será a de que até uma percentagem de colmatação de 85%, as alturas de água aumentam em média 5,3% entre linhas.

Mostram-se agora na Figura 5.3 as diferenças relativas da altura de água abaixo das aberturas no topo do ralo sifônico para o caudal Q_0 .

Analisando a Figura 5.3 conclui-se que as diferenças relativas são na sua maioria, inferiores a 10%, o que pode ser considerado um erro aceitável. Inicialmente apresentam valores maioritariamente positivos em todas as percentagens de colmatação. No final do ensaio surgem alguns valores negativos, mais notoriamente nas percentagens de colmatação de 10% e 50%. Os valores lidos dentro da zona de caudal variável devem ser observados com atenção e não tidos em conta, pelas razões já descritas anteriormente.

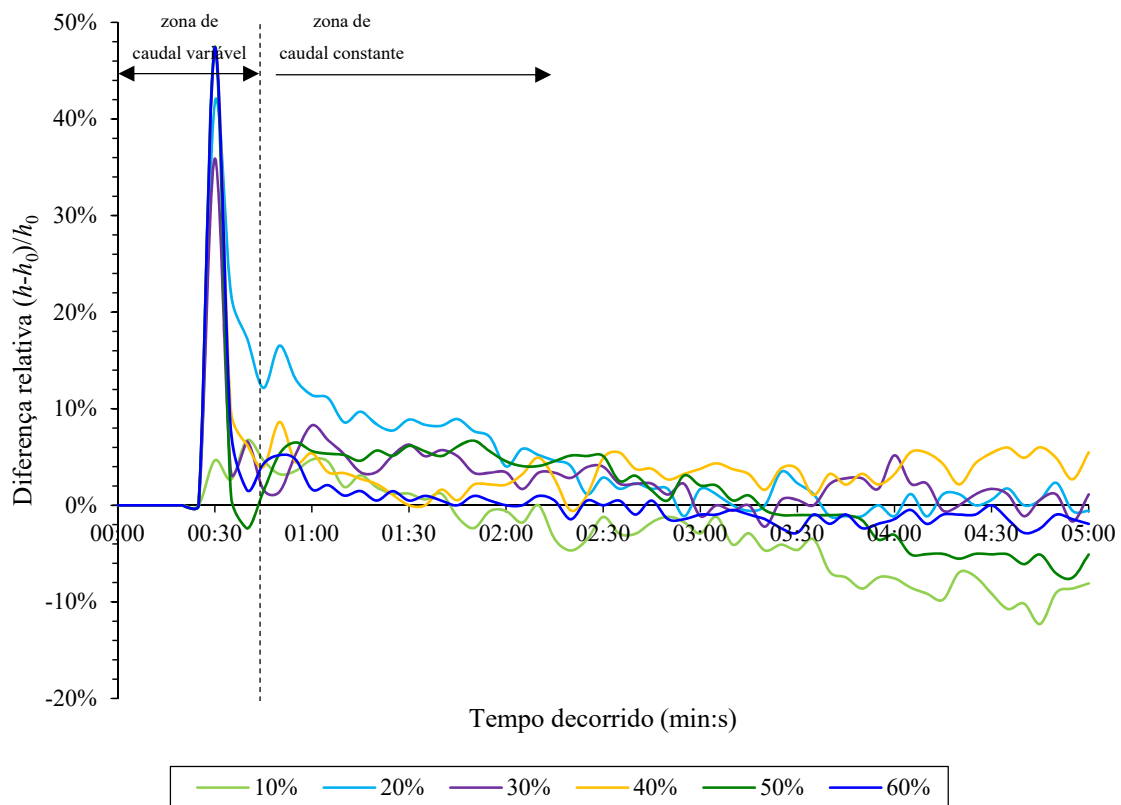


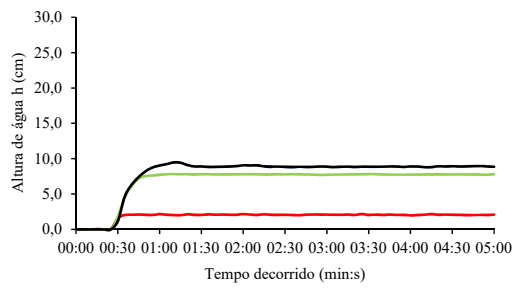
Figura 5.3: Diferenças relativas $(h-h_0)/h_0$ em leituras da altura de água em datas distintas para o caudal Q_0 nas percentagens de 10% a 60%.

5.2 Caudal $0,8 \times Q_0$

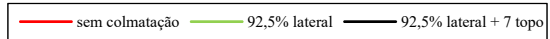
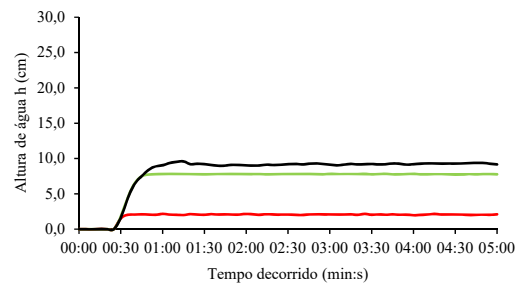
Com o objetivo de se descrever e compreender o comportamento do ralo sifónico para o caudal $0,8 \times Q_0$, construiu-se um gráfico da altura de água em função do tempo para as duas formas de colmatações efetuadas: colmatção lateral + topo e colmatção lateral. É possível assim analisar as diferenças que ocorrem quando se colmata de uma ou de outra forma. Incluiu-se também, para referência, a linha do ensaio sem colmatção.

Relembra-se que para este caudal $0,8 \times Q_0$ não se efetuaram os ensaios de colmatção no topo pois qualquer que fosse a colmatção aplicada, a altura de água não atingiria o topo do ralo sifónico e ir-se-iam obter as mesmas leituras.

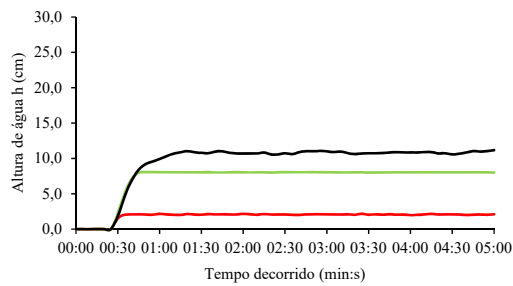
Pelas razões já descritas anteriormente, analisam-se agora as percentagens de colmatção cuja altura de água foi superior à altura h das aberturas no topo do ralo sifónico. Mais concretamente, analisam-se as percentagens de 90% a 100%. Mostra-se na Figura 5.4 a diferença de alturas entre a colmatção lateral + topo e colmatção lateral. Observa-se que as linhas da colmatção lateral + topo são tendencialmente superiores às linhas da colmatção lateral. Os gráficos das restantes percentagens de colmatção encontram-se no Anexo 1.



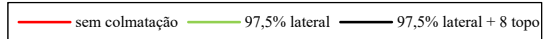
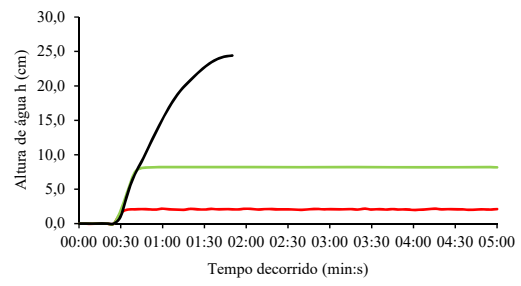
a) Colmatação de 90%



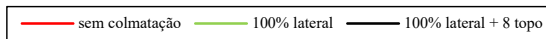
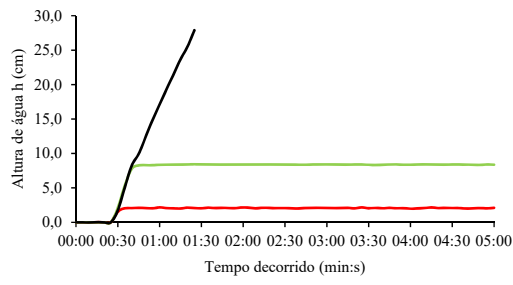
b) Colmatação de 92,5%



c) Colmatação de 95%



d) Colmatação de 97,5%



e) Colmatação de 100%

Figura 5.4: Alturas de água dos ensaios efetuados para o caudal $0,8 \times Q_0$, para a colmatação de 90% a 100%.

Observando o gráfico da Figura 5.5, verifica-se que as diferenças relativas entre as linhas da colmatação lateral + topo e colmatação lateral assumem valores maiores do que 10% em praticamente todas as percentagens de colmatação.

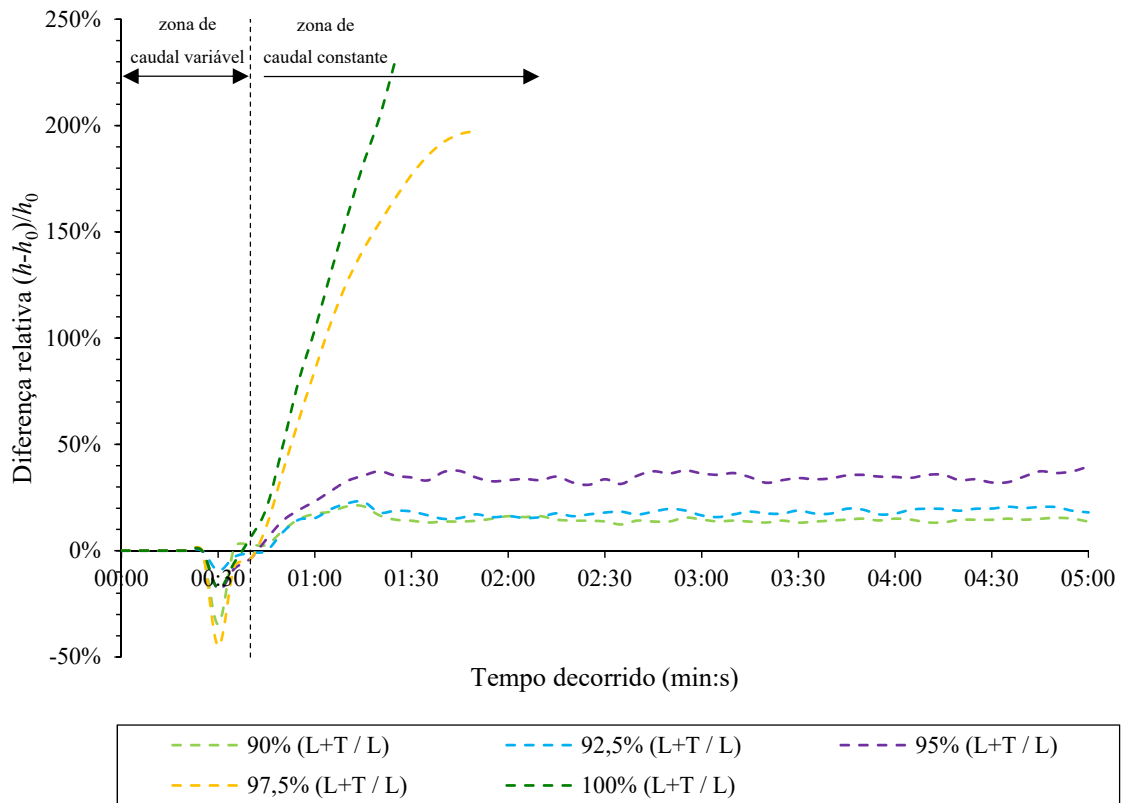


Figura 5.5: Diferenças relativas $(h-h_0)/h_0$ entre as colmatações lateral + topo e lateral, para todas as percentagens desde 90% a 100% no caudal $0,8 \times Q_0$.

Concretamente, encontram-se resumidos na Tabela 5.1 os valores mais importantes que se retiram da Figura 5.5 e com os quais se podem retirar algumas conclusões.

Tabela 5.1: Diferenças relativas entre colmatação lateral + topo e colmatação lateral, para as percentagens de colmatação de 90% a 100% no caudal $0,8 \times Q_0$.

Percentagem de colmatação	Diferença relativa	
	Média	Final
90%	14,8%	-
92,5%	18,2%	-
95%	34,4%	-
97,5%	-	197,6%
100%	-	230,8%

A notar, as percentagens de colmatação de 90% a 95% assumem valores entre 14,8% e 34,4%. A percentagem de colmatação 97,5% apresenta um valor final de 73,5%. A colmatação de 100% apresenta um valor final de 230,8% de diferença relativa.

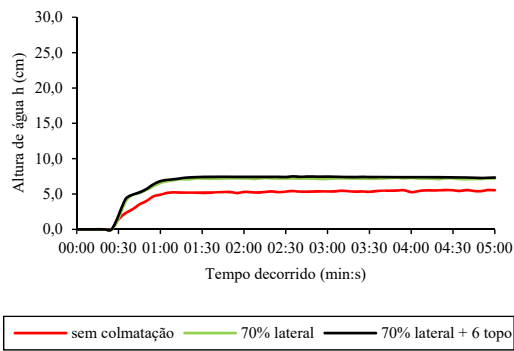
Conclui-se assim que acima da altura h das aberturas no topo do ralo sifónico e para uma mesma percentagem de colmatação lateral, o facto de se tapar as aberturas no topo do ralo sifónico tem influência no caudal escoado. Assume particular importância nas colmatações de 97,5% e 100%.

5.3 Caudal Q_0

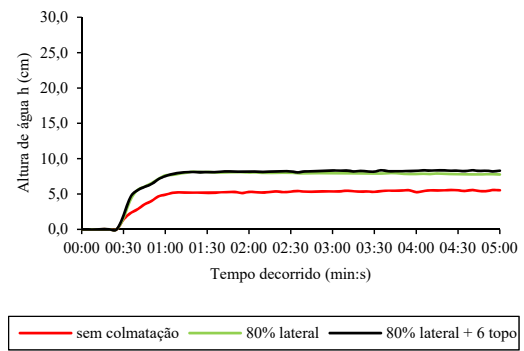
Relativamente ao caudal Q_0 , construiu-se um gráfico da altura de água em função do tempo para as duas formas de colmatações efetuadas: colmatação lateral + topo e colmatação lateral. Permitiu assim descrever e compreender o comportamento do ralo sifónico nas várias percentagens de colmatação efetuadas. Incluiu-se também, para referência, a linha do ensaio sem colmatação.

Importa relembrar que para este caudal Q_0 não se efetuou os ensaios de colmatação no topo pois qualquer que fosse a colmatação aplicada, a altura de água não atingiria o topo do ralo sifónico e ir-se-ia obter as mesmas leituras.

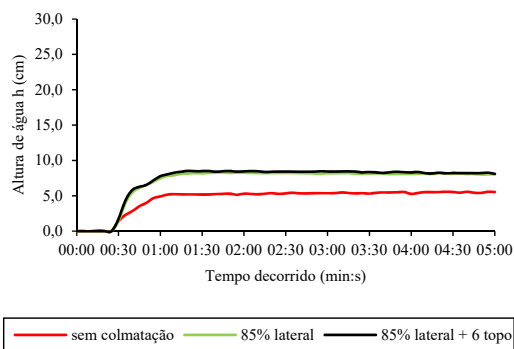
Tal como sucedeu para o caudal anterior, analisam-se apenas as percentagens de colmatação cuja altura de água foi superior à altura h das aberturas no topo do ralo sifónico. Mais concretamente, analisam-se as percentagens de 70% a 100%. Observa-se na Figura 5.6 a evolução das alturas de água para as colmatações lateral e lateral + topo. Observa-se que as linhas da colmatação lateral + topo são tendencialmente superiores às linhas da colmatação lateral. Os gráficos das restantes percentagens de colmatação encontram-se no Anexo 1.



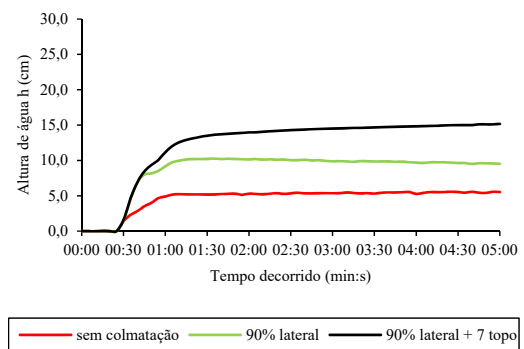
a) Colmatação de 70%



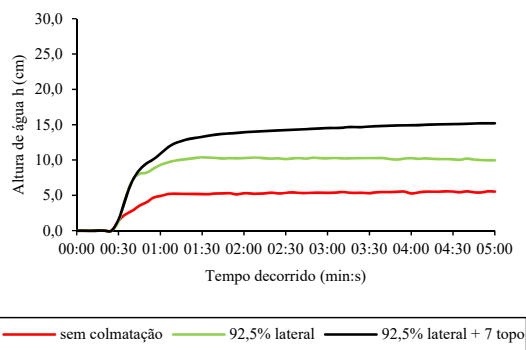
b) Colmatação de 80%



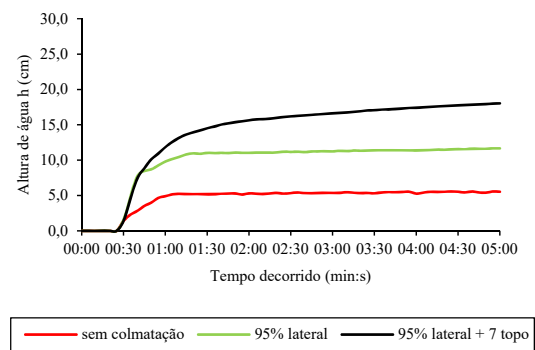
c) Colmatação de 85%



d) Colmatação de 90%

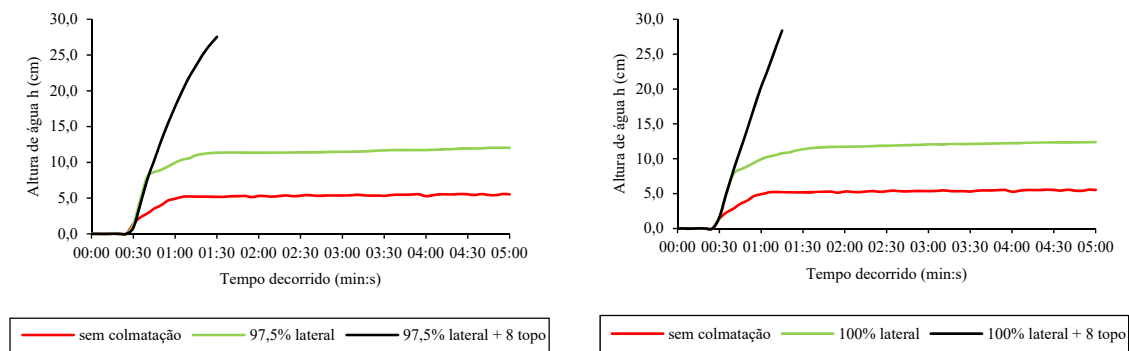


e) Colmatação de 92,5%



f) Colmatação de 95%

Figura 5.6: Alturas de água dos ensaios efetuados para o caudal Q_0 , para a colmatação de 70% a 100%.



g) Colmatação de 97,5% h) Colmatação de 100%

Figura 5.6: Alturas de água dos ensaios efetuados para o caudal Q_0 , para a colmatação de 70% a 100% (continuação).

Observando agora o gráfico da Figura 5.7, verifica-se que as diferenças relativas da colmatação lateral + topo e colmatação lateral assumem valores menores que 10% para as percentagens de colmatação de 70%, 80% e 85%. Acima destas percentagens, as diferenças relativas são bastante mais elevadas. Demonstra que para percentagens de colmatação elevadas há uma clara diferença entre a colmatação lateral + topo e a colmatação lateral.

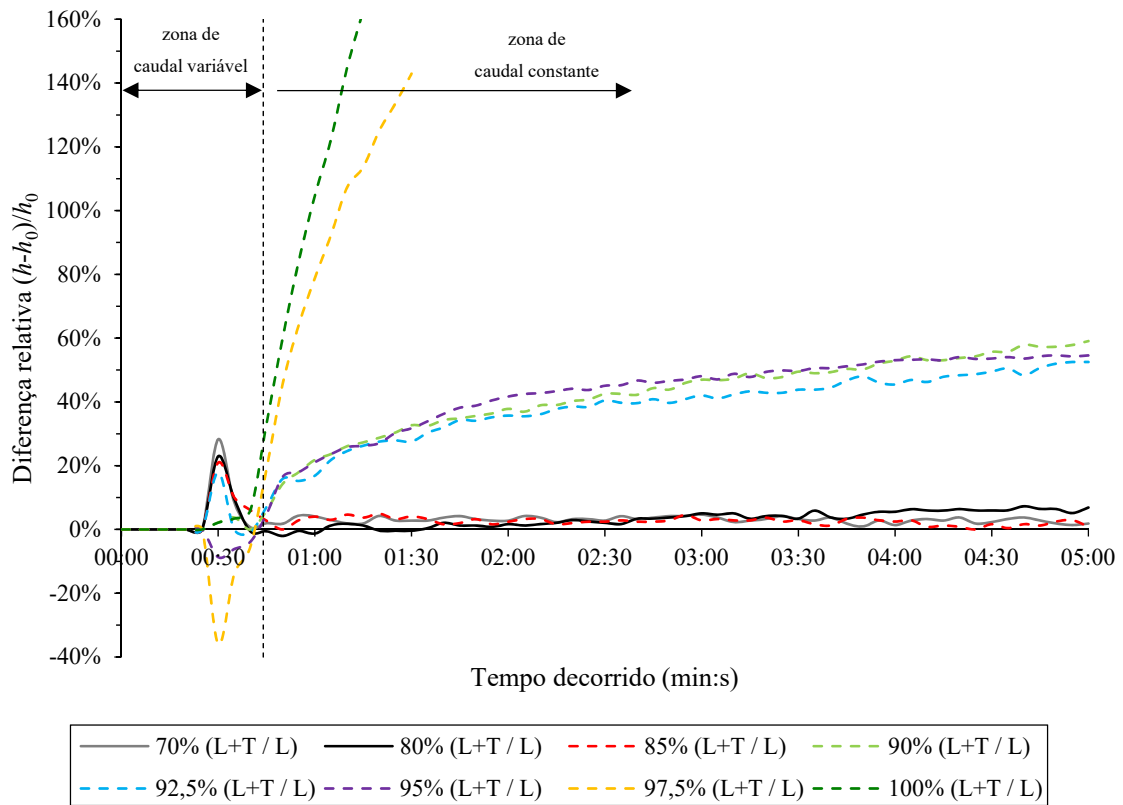


Figura 5.7: Diferenças relativas $(h-h_0)/h_0$ entre as colmatagens lateral + topo e lateral, para todas as percentagens desde 70% a 100% no caudal Q_0 .

Encontra-se resumido na Tabela 5.2 os valores mais importantes que se retiram da Figura 5.7, para percentagens de colmatagem iguais ou superiores a 70%.

Tabela 5.2: Diferenças relativas entre colmatação lateral + topo e colmatação lateral, para as percentagens de colmatação de 70% a 100% no caudal Q_0 .

Percentagem de colmatação	Diferença relativa	
	Média	Final
70%	3,0%	-
80%	3,5%	-
85%	2,5%	-
90%	-	59,1%
92,5%	-	52,5%
95%	-	54,6%
97,5%	-	142,9%
100%	-	162,7%

A notar, as percentagens de colmatação de 90% a 95% assumem valores entre 52,5% e 59,1%. A percentagem de colmatação 97,5% apresenta um valor final de 142,9%. A colmatação de 100% apresenta um valor final de 162,7%. As percentagens de 70% a 85% apresentam médias entre 2,5% e 3,5%.

Conclui-se assim que para uma mesma percentagem de colmatação lateral, o facto de se tapar as aberturas no topo do ralo sifónico tem influência no caudal escoado. Assume particular importância nas colmatações mais elevadas. Quando colmatado a 97,5% lateralmente e no topo, o ensaio termina aos 01:30 minutos. Se apenas for colmatado lateralmente, o ensaio atinge a duração completa de 5 minutos. Para a colmatação de 100% lateral + topo obtém-se um resultado semelhante. Atinge-se apenas 01:25 minutos na colmatação lateral + topo e 5 minutos na colmatação lateral.

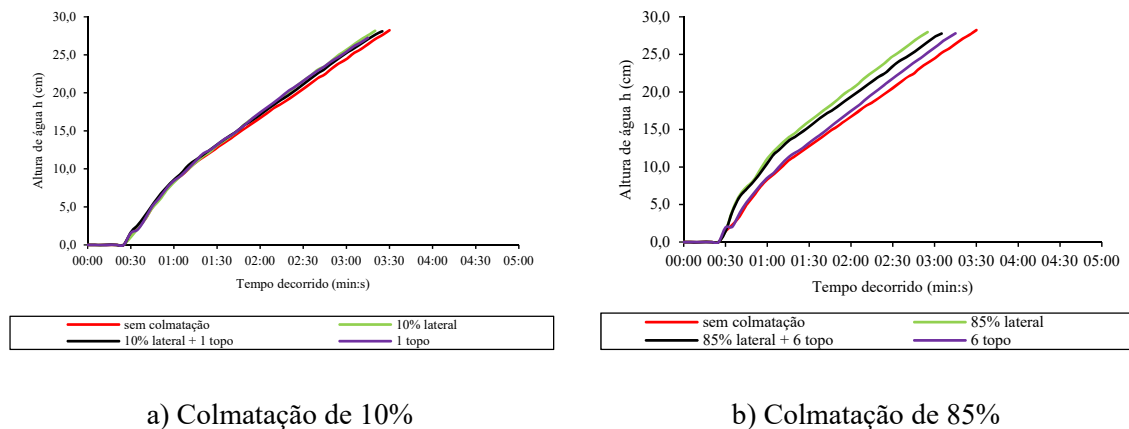
Uma outra conclusão importante a se retirar será a de que até uma percentagem de colmatação de 85%, as alturas de água aumentam em média 1,6% entre linhas. Após esta percentagem de colmatação, as alturas de água aumentam bastante a distância entre si, em relação às anteriores. Demonstra novamente a influência que a colmatação das aberturas no topo do ralo sifónico tem no desempenho do escoamento.

5.4 Caudal $1,2 \times Q_0$

5.4.1 Comparação de colmatção lateral + topo com a colmatção lateral

Considerando o caudal $1,2 \times Q_0$, construiu-se um gráfico da altura de água em função do tempo para as três formas de colmatções efetuadas: colmatção lateral + topo, colmatção lateral e colmatção no topo. Permitiu assim descrever e compreender o comportamento do ralo sifônico nas várias percentagens de colmatção efetuadas. Incluiu-se também, para referência, a linha do ensaio sem colmatção.

Na Figura 5.8 observa-se a evolução das alturas de água para as colmatções lateral, lateral + topo e apenas topo, para 10% e 85%. Por serem semelhantes, os gráficos das percentagens de colmatção intermédias encontram-se no Anexo 1.



a) Colmatção de 10%

b) Colmatção de 85%

Figura 5.8: Alturas de água dos ensaios efetuados para o caudal $1,2 \times Q_0$, para a colmatção de 10% e 85%.

Para a percentagem de colmatção de 10%, as linhas das três colmatções efetuadas deram bastante próximas entre si e dentro do esperado, com a linha sem colmatção abaixo destas.

Na percentagem de colmatção de 85% observa-se que a linha da colmatção lateral + topo está abaixo da linha da colmatção lateral. O resultado lógico e esperado seria o oposto.

Efetuuou-se o gráfico das diferenças relativas $(h-h_0)/h_0$ entre as colmatções lateral + topo e lateral visível na Figura 5.9. Observa-se que para uma percentagem de colmatção de até 85%, as diferenças relativas assumem em média, valores menores do que 10% ao longo de

todo o ensaio. Significa que as alturas de água estão separadas entre si não mais de 10% ao longo do ensaio. Para valores de percentagem de colmatação superior ou igual a 90% observa-se valores superiores aos demais, ou seja, as alturas de água começam a distanciar-se mais.

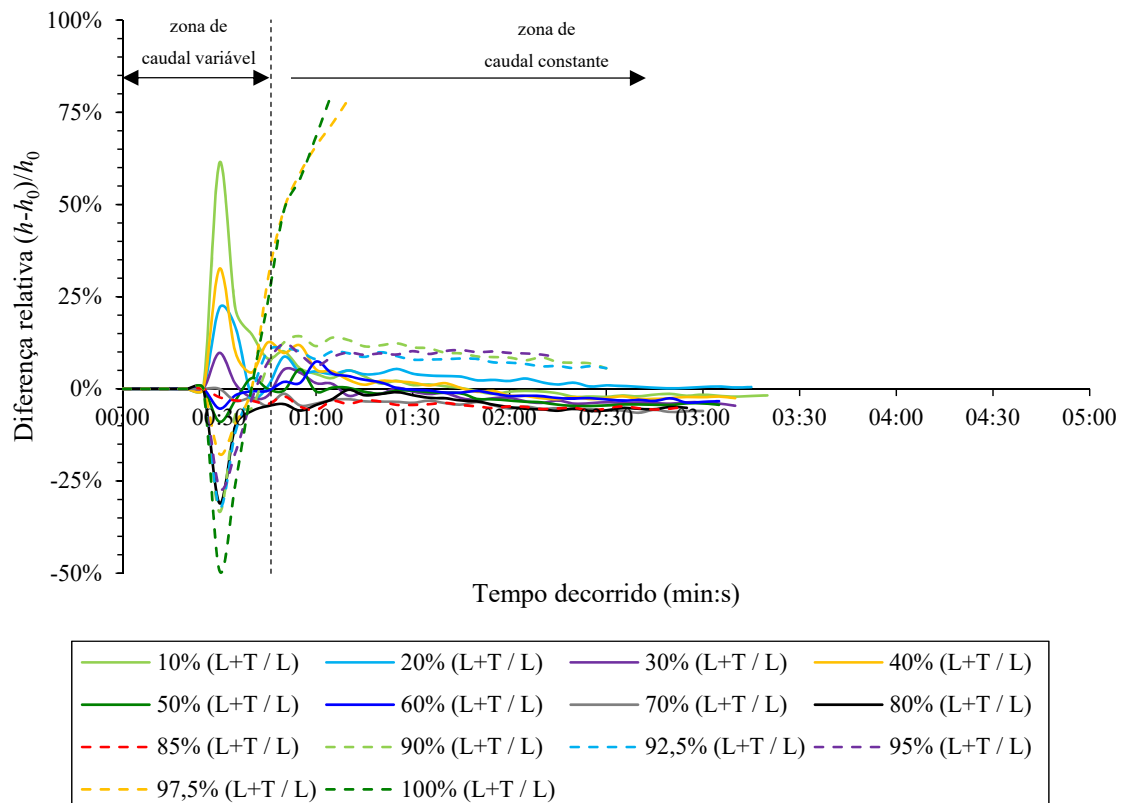


Figura 5.9: Diferenças relativas $(h-h_0)/h_0$ entre as colmatações lateral + topo e lateral, para todas as percentagens de colmatação no caudal $1,2 \times Q_0$.

Fazendo um novo gráfico mostrando apenas as percentagens de colmatação de 10% a 85%, torna-se mais visível o valor das diferenças relativas (Figura 5.10). Nas percentagens de colmatação até 85%, os valores das diferenças relativas rondam numa média de 1,8%.

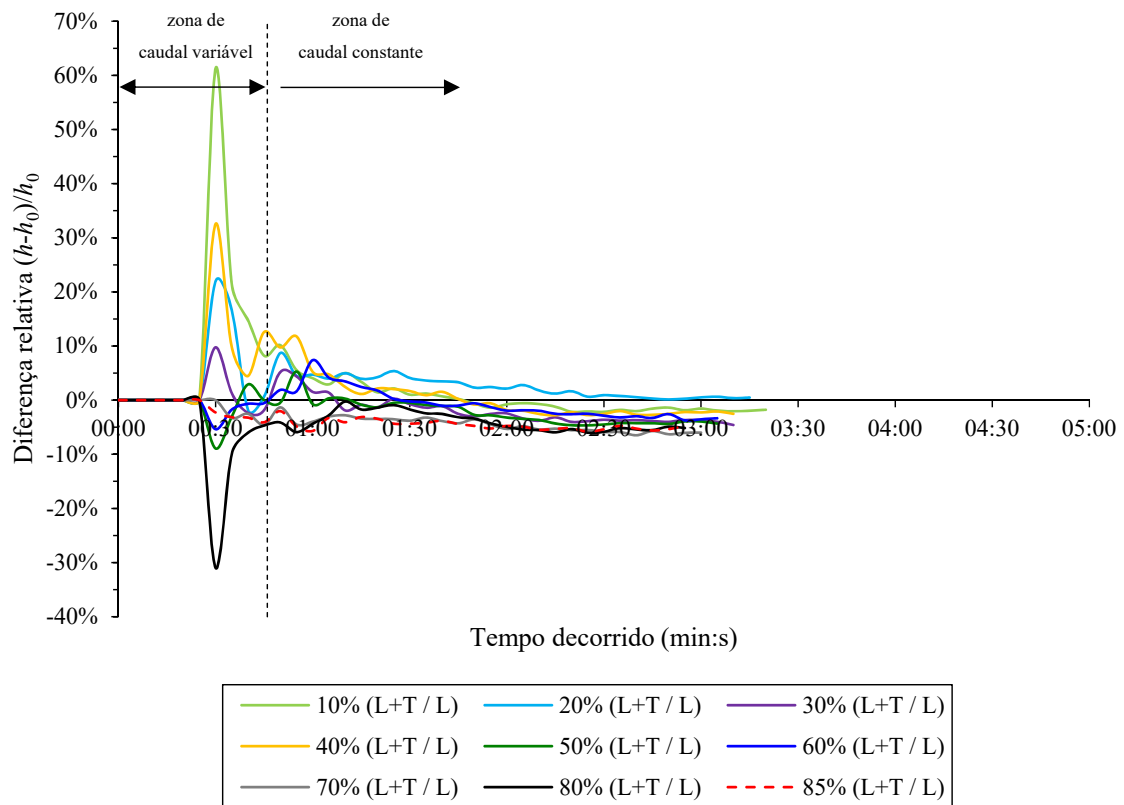


Figura 5.10: Diferenças relativas $(h-h_0)/h_0$ entre as colmatações lateral + topo e lateral, para todas as percentagens desde 10% a 85% no caudal $1,2 \times Q_0$.

Em percentagens de colmatação superior ou igual a 90% começa a acentuar-se a diferença de alturas entre a colmatação lateral + topo e colmatação lateral. Esse facto torna-se mais evidente na Figura 5.11 onde se observa que as linhas da colmatação lateral + topo são superiores às linhas da colmatação lateral.

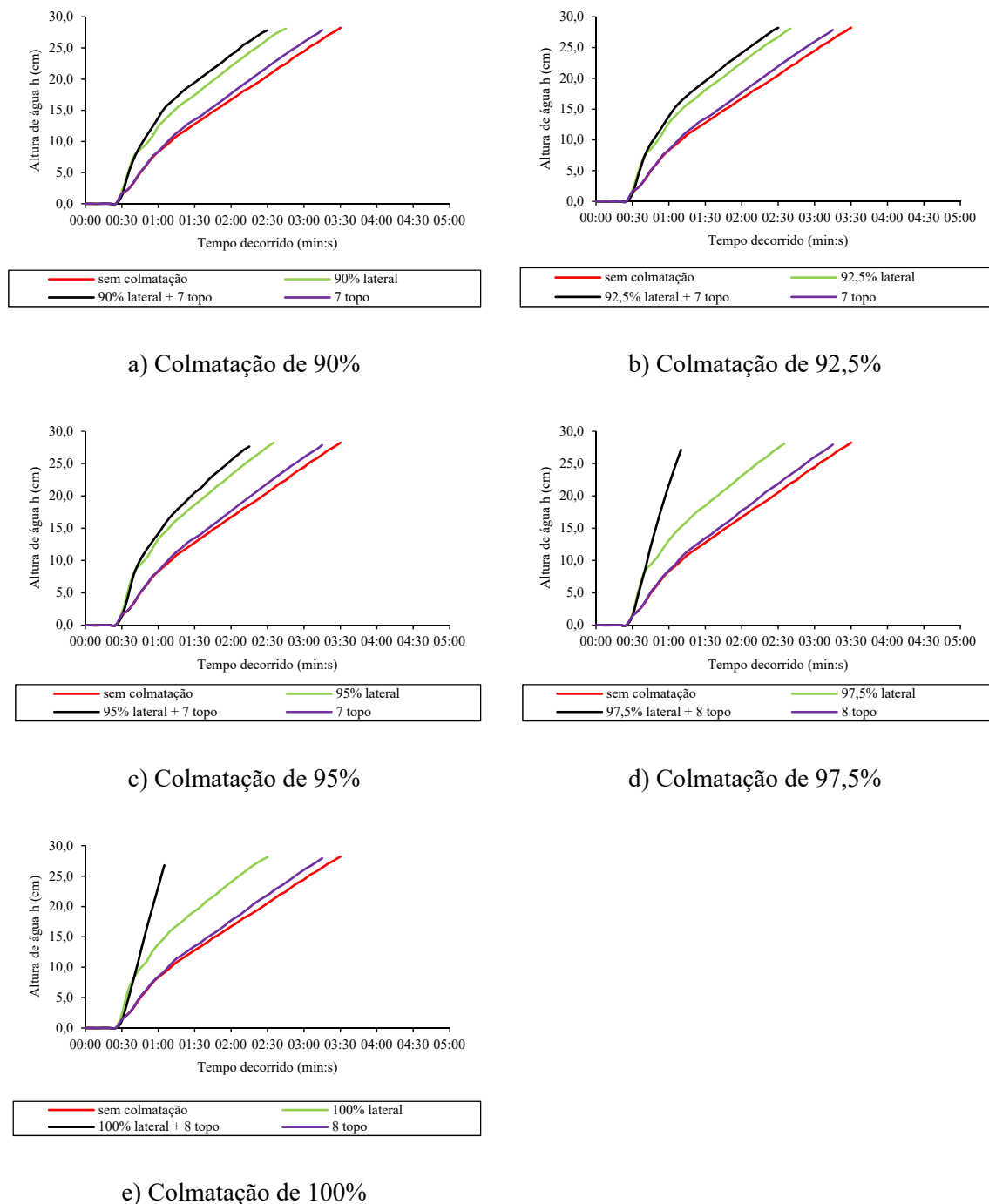


Figura 5.11: Alturas de água dos ensaios efetuados para o caudal $1,2 \times Q_0$, para a colmatação de 90% a 100%.

Analisando o gráfico da Figura 5.9 e da Figura 5.12, confirma-se que as diferenças relativas entre as linhas da colmatação lateral + topo e colmatação lateral se torna mais evidente para percentagens de colmatação superior ou igual a 90%. Assume valores maiores ou iguais a 10% em praticamente todas as percentagens de colmatação.

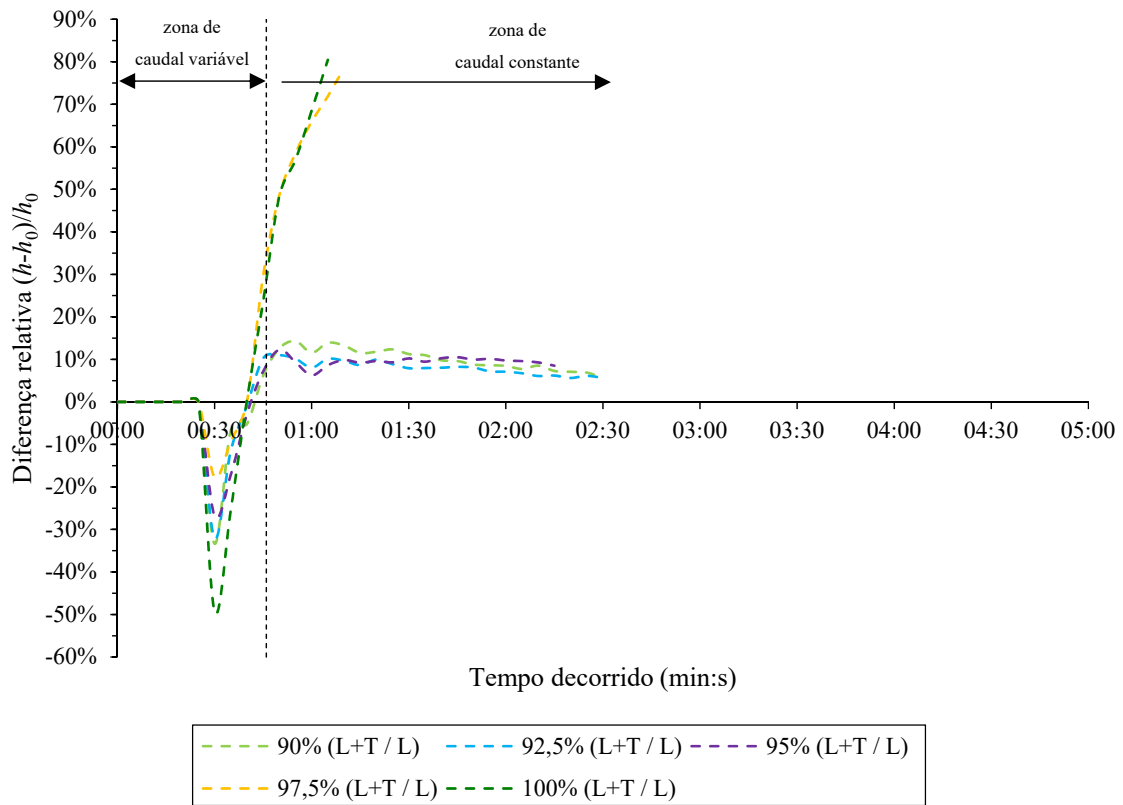


Figura 5.12: Diferenças relativas $(h-h_0)/h_0$ entre as colmatações lateral + topo e lateral, para todas as percentagens desde 90% a 100% no caudal $1,2 \times Q_0$.

Concretamente, encontra-se resumido na Tabela 5.3 os valores mais importantes que se retiram da Figura 5.12.

Tabela 5.3: Diferenças relativas entre colmatação lateral + topo e colmatação lateral, para as percentagens de colmatação de 90% a 100% no caudal $1,2 \times Q_0$.

Percentagem de colmatação	Diferença relativa	
	Média	Final
90%	9,7%	-
92,5%	7,7%	-
95%	9,4%	-
97,5%	-	78,5%
100%	-	80,4%

A notar, as percentagens de colmatação de 90% a 95% assumem valores entre 7,7% e 9,7%. A percentagem de colmatação 97,5% apresenta um valor final de 78,5%. A colmatação de 100% apresenta um valor final de 80,4%.

Conclui-se assim que para uma mesma percentagem de colmatação lateral, o facto de se tapar as aberturas no topo do ralo sifónico tem influência no caudal escoado. Assume particular importância nas colmatações mais elevadas. Quando colmatado a 97,5% lateralmente e no topo, o ensaio termina aos 01:10 minutos. Se apenas for colmatado lateralmente, o ensaio atinge a duração de 02:35 minutos. Para a colmatação de 100% lateral + topo obtém-se um resultado semelhante. Atinge-se apenas 01:05 minutos na colmatação lateral + topo e 02:30 minutos na colmatação lateral.

5.4.2 Comparação de colmatação no topo e sem colmatação

Com os valores das alturas de água apresentados na Figura 4.15, para o caudal $1,2 \times Q_0$, criou-se o gráfico de diferenças relativas $(h-h_0)/h_0$ da Figura 5.13. Este compara a diferença relativa entre as várias colmatações efetuadas apenas no topo do ralo e a situação sem colmatação.

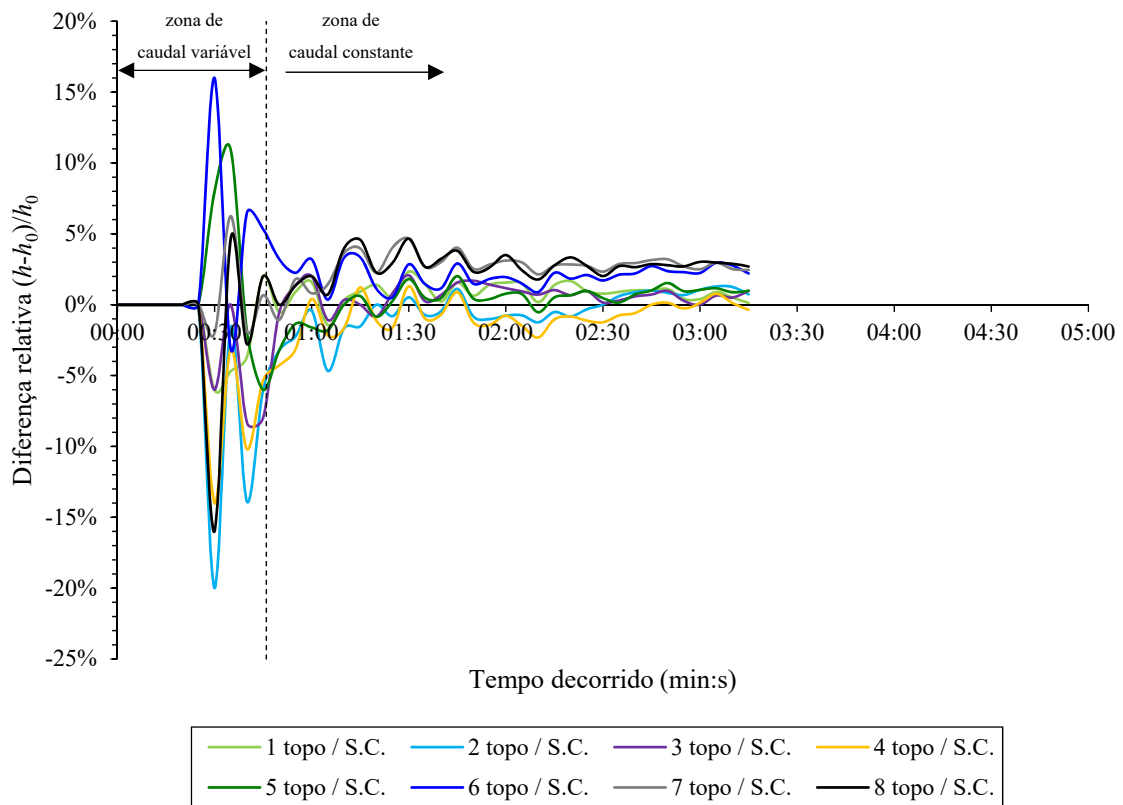


Figura 5.13: Diferenças relativas $(h-h_0)/h_0$ entre a colmatação no topo e sem colmatação, para o caudal $1,2 \times Q_0$.

Nota-se que após o período de turbulência e indefinição inicial, dos 00:30 aos 01:00 minutos, os valores das diferenças relativas em relação a sem colmatação, são todos inferiores a 5%. Este valor pode ser considerado baixo e dentro do erro experimental. Pode-se concluir que por si só, a colmatação no topo não terá influência nas alturas de água. A ter influência no desempenho do ralo, será de uma ordem significativamente mais baixa do que a da colmatação lateral.

5.5 Caudal $1,4 \times Q_0$

5.5.1 Comparação de colmatação lateral + topo com a colmatação lateral

As observações feitas para este caudal $1,4 \times Q_0$ serão bastante semelhantes ao caudal anterior, $1,2 \times Q_0$. Estes apresentam um comportamento idêntico, variando apenas no instante em que se atinge.

Considerando o caudal $1,4 \times Q_0$, construiu-se um gráfico da altura de água em função do tempo para as três formas de colmatações efetuadas: colmatação lateral + topo, colmatação lateral e colmatação no topo. Permitiu assim descrever e compreender o comportamento do ralo sifônico nas várias percentagens de colmatação efetuadas. Incluiu-se também, para referência, a linha do ensaio sem colmatação.

Na Figura 5.14 observa-se a evolução das alturas de água para as colmatações lateral, lateral + topo e apenas topo, para 10% e 85%. Por serem semelhantes, os gráficos das percentagens de colmatação intermédias encontram-se no Anexo 1.

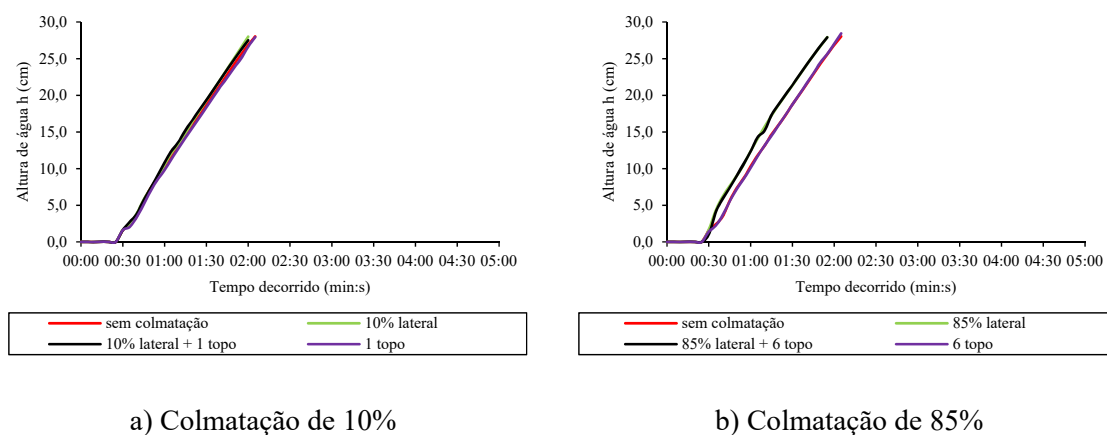


Figura 5.14: Alturas de água dos ensaios efetuados para o caudal $1,4 \times Q_0$, para a colmatação de 10% e 85%.

Para a percentagem de colmatação de 10%, as linhas das três colmatações efetuadas deram bastante próximas entre si e dentro do esperado, com a linha sem colmatação abaixo destas.

Na percentagem de colmatação de 85% observa-se as linhas de colmatação lateral + topo e colmatação lateral ligeiramente acima das linhas de colmatação no topo e sem colmatação. Este é o resultado esperado.

Efetuuou-se o gráfico das diferenças relativas $(h-h_0)/h_0$ entre as colmatações lateral + topo e lateral visível na Figura 5.15. Observa-se que para uma percentagem de colmatação de até 85%, as diferenças relativas assumem em média, valores menores do que 10% ao longo de todo o ensaio. Significa que as alturas de água estão separadas entre si não mais de 10% ao longo do ensaio. Para valores de percentagem de colmatação superior ou igual a 90%

observa-se valores superiores aos demais, ou seja, as alturas de água começam a distanciar-se mais.

Ainda na mesma figura, note-se a zona de caudal variável. Este é um intervalo de tempo de maior indefinição pois o tanque encontra-se em fase de enchimento e o efeito sifónico está a formar-se (nalguns casos apenas), o que leva a que as leituras apresentem maior variação. As diferenças relativas tendem a assumir o seu valor real após este período.

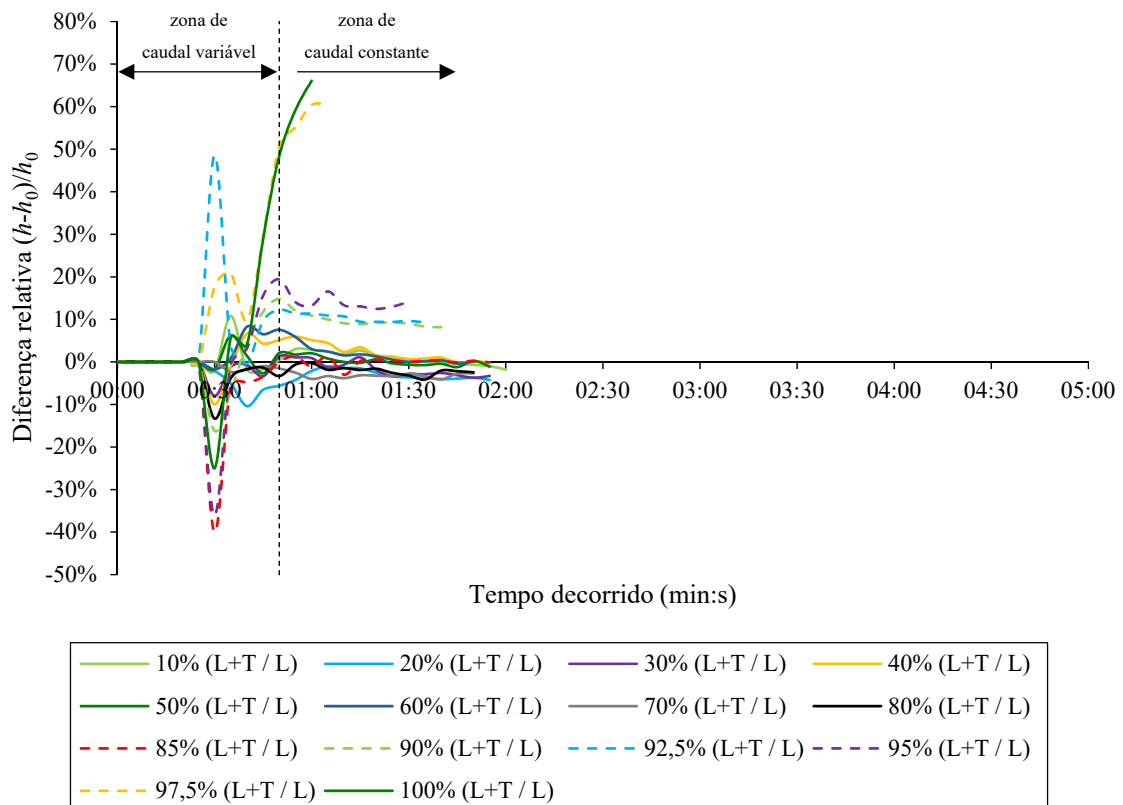


Figura 5.15: Diferenças relativas $(h-h_0)/h_0$ entre as colmatações lateral + topo e lateral, para todas as percentagens de colmatação no caudal $1,4 \times Q_0$.

Fazendo um novo gráfico mostrando apenas as percentagens de colmatação de 10% a 85%, torna-se mais visível o valor das diferenças relativas (Figura 5.16). Nas percentagens de colmatação até 85%, os valores das diferenças relativas rondam numa média de -0,6%. Ou seja, a altura das linhas de água na colmatação lateral + topo são em média 0,6% mais baixas que as linhas da colmatação lateral. É um valor próximo de zero e que poderá resultar do erro experimental, como observado para o caudal $1,2 \times Q_0$ para a mesma percentagem de colmatação.

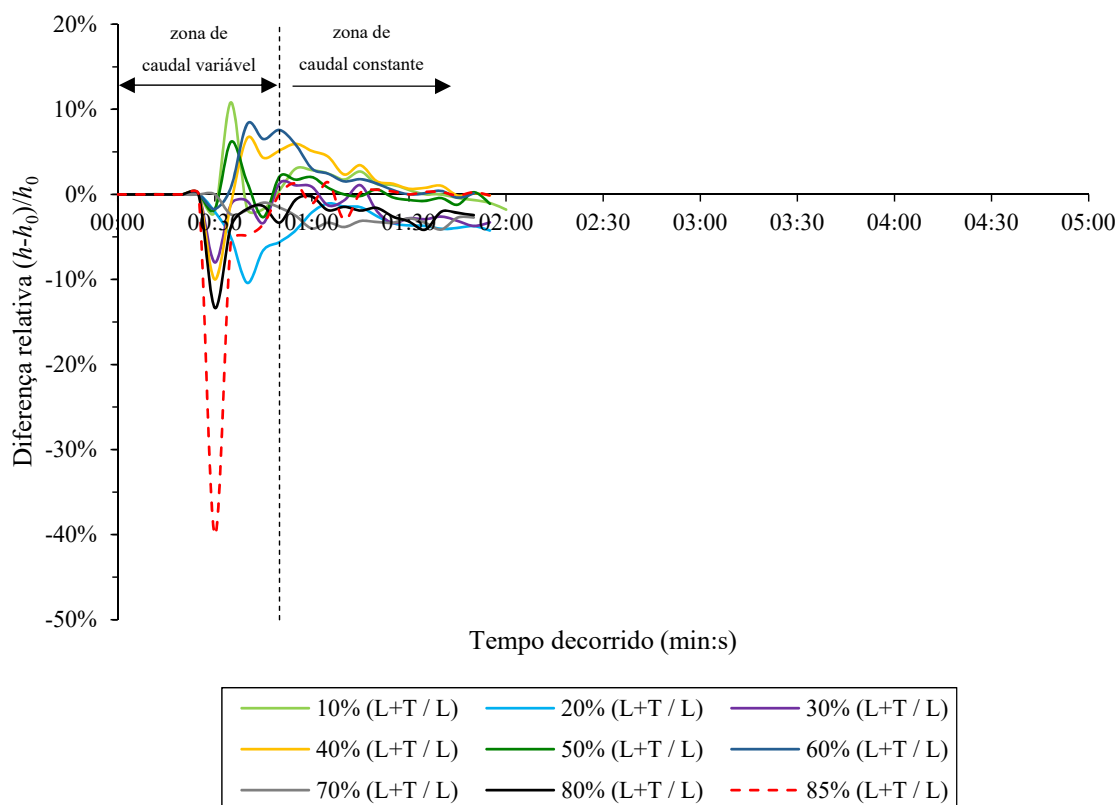
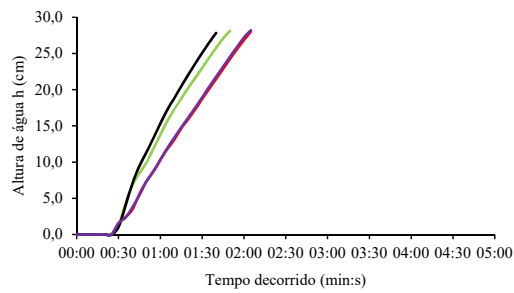
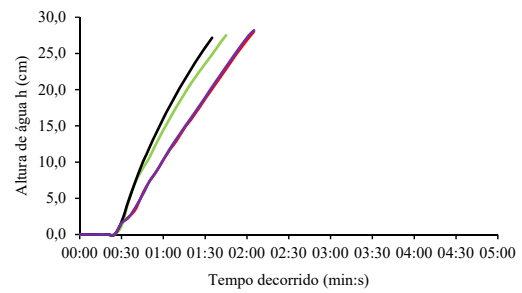


Figura 5.16: Diferenças relativas $(h-h_0)/h_0$ entre as colmatações lateral + topo e lateral, para todas as percentagens desde 10% a 85% no caudal $1,4 \times Q_0$.

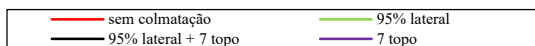
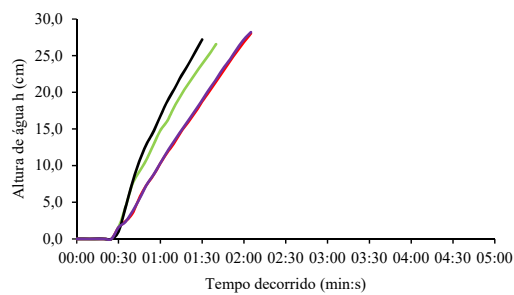
Em percentagens de colmatação superior ou igual a 90% começa a acentuar-se a diferença de alturas entre a colmatação lateral + topo e colmatação lateral. Esse facto torna-se mais evidente na Figura 5.17 onde se observa que as linhas da colmatação lateral + topo são superiores às linhas da colmatação lateral.



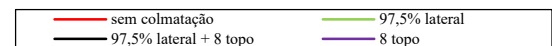
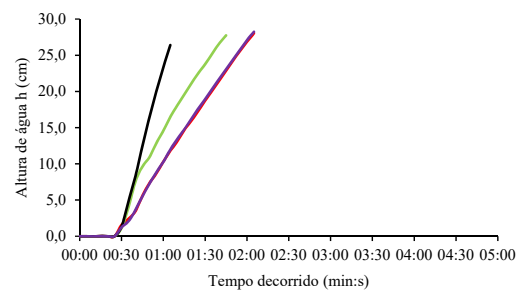
a) Colmatação de 90%



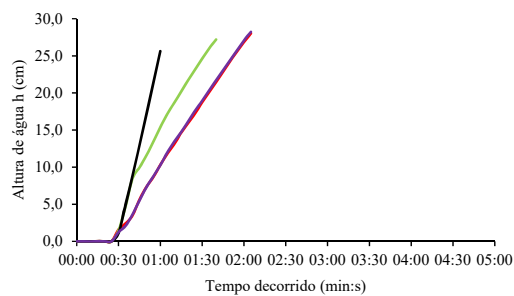
b) Colmatação de 92,5%



c) Colmatação de 95%



d) Colmatação de 97,5%



e) Colmatação de 100%

Figura 5.17: Alturas de água dos ensaios efetuados para o caudal $1,4 \times Q_0$, para a colmatação de 90% a 100%.

Analisando o gráfico da Figura 5.15 e da Figura 5.18, confirma-se que as diferenças relativas entre as linhas da colmatação lateral + topo e colmatação lateral se torna mais evidente para percentagens de colmatação superior ou igual a 90%. Assume valores maiores ou iguais a 10% em praticamente todas as percentagens de colmatação.

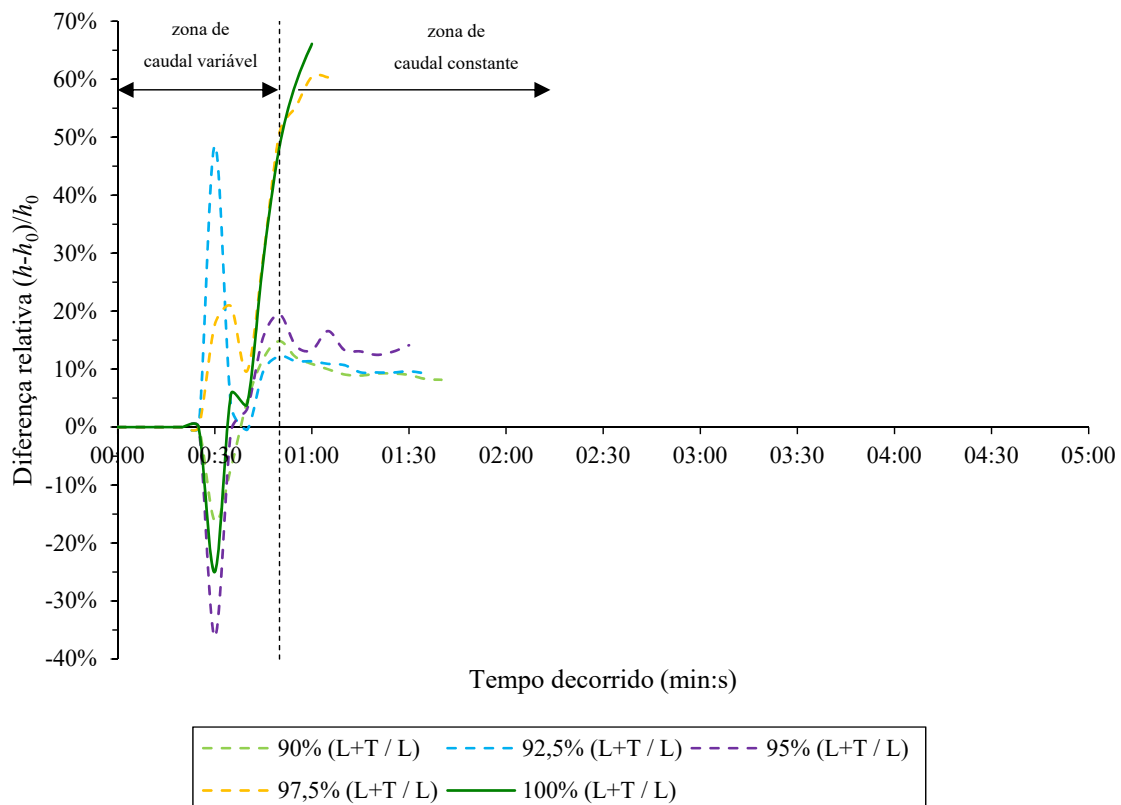


Figura 5.18: Diferenças relativas $(h-h_0)/h_0$ entre as colmatações lateral + topo e lateral, para todas as percentagens desde 90% a 100% no caudal $1,4 \times Q_0$.

Concretamente, encontra-se resumido na Tabela 5.4 os valores mais importantes que se retiram da Figura 5.18.

Tabela 5.4: Diferenças relativas entre colmatação lateral + topo e colmatação lateral, para as percentagens de colmatação de 90% a 100% no caudal $1,4 \times Q_0$.

Percentagem de colmatação	Diferença relativa	
	Média	Final
90%	10,1%	-
92,5%	10,3%	-
95%	14,5%	-
97,5%	-	60,3%
100%	-	66,1%

A notar, as percentagens de colmatação de 90% a 95% assumem valores entre 10,1% e 14,5%. A percentagem de colmatação 97,5% apresenta um valor final de 60,3%. A colmatação de 100% apresenta um valor final de 66,1%.

Conclui-se assim que para uma mesma percentagem de colmatação lateral, o facto de se tapar as aberturas no topo do ralo sifónico tem influência no caudal escoado. Assume particular importância nas colmatações mais elevadas. Quando colmatado a 97,5% lateralmente e no topo, o ensaio termina aos 01:05 minutos. Se apenas for colmatado lateralmente, o ensaio atinge a duração de 01:45 minutos. Para a colmatação de 100% lateral + topo obtém-se um resultado semelhante. Atinge-se apenas 01:00 minutos na colmatação lateral + topo e 01:40 minutos na colmatação lateral.

5.5.2 Comparação de colmatação no topo e sem colmatação

Com os valores das alturas de água obtidos na Figura 4.16, criou-se o gráfico de diferenças relativas $(h-h_0)/h_0$ da Figura 5.19. Este compara a diferença relativa entre as várias colmatações efetuadas apenas no topo do ralo e a situação sem colmatação.

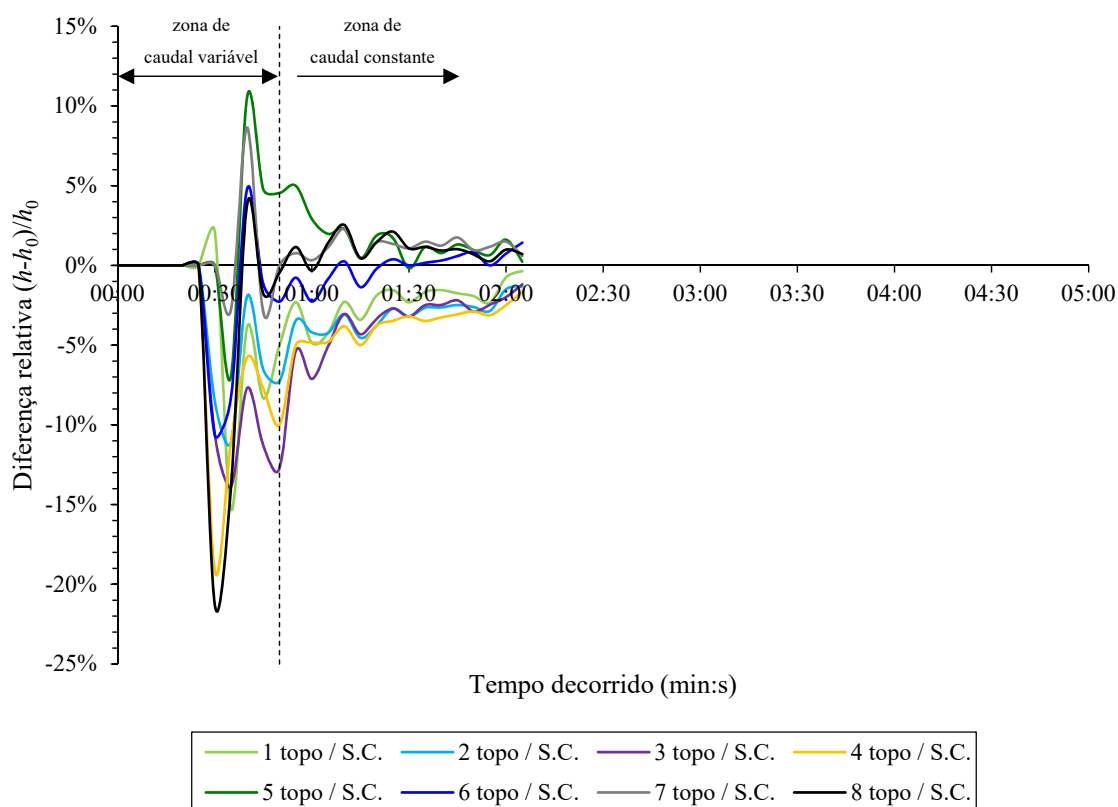


Figura 5.19: Diferenças relativas $(h-h_0)/h_0$ entre a colmatação no topo e sem colmatação, para o caudal $1,4 \times Q_0$.

Nota-se que dentro da zona de caudal variável os valores das diferenças relativas em relação a sem colmatação, são todos inferiores a 5%. Este valor pode ser considerado baixo e dentro do erro experimental. Pode-se concluir que por si só, a colmatação no topo não terá influência nas alturas de água. A ter influência no desempenho do ralo, será de uma ordem significativamente mais baixa do que a da colmatação lateral, tal como observado para o caudal $1,2 \times Q_0$.

Pode-se chegar à mesma conclusão através do gráfico h/h_0 da Figura 5.20, em que h corresponde à altura de água na situação de colmatação no topo e h_0 corresponde à altura de água na situação sem colmatação, ambas no final de cada ensaio. Nele, são comparadas as alturas de água adimensionalizadas, para os dois caudais maiores em estudo. Em ambos os caudais e para os vários graus de colmatação no topo, h/h_0 foi sempre muito próximo de 1,0. Isto significa que não há praticamente diferença entre a altura de água quando colmatado no topo e quando sem colmatação.

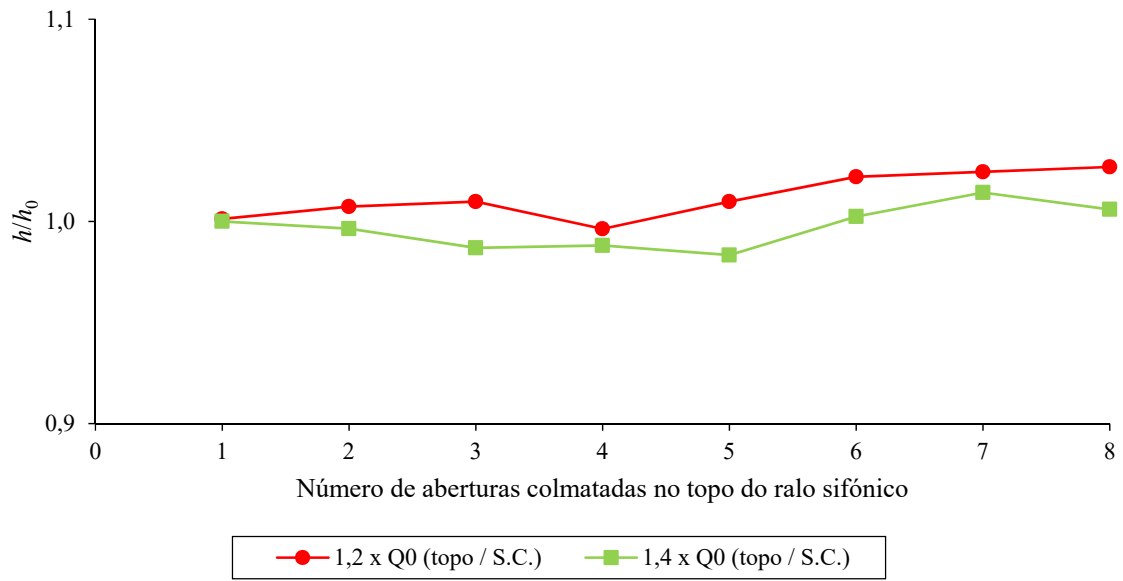


Figura 5.20: Diferenças relativas h/h_0 entre a colmatação no topo e sem colmatação, para o caudal $1,2 \times Q_0$ e $1,4 \times Q_0$.

Capitulo 6

CONSIDERAÇÕES FINAIS

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste último capítulo apresentam-se as conclusões desta dissertação, bem como possíveis sugestões para trabalhos futuros.

6.1 Conclusões

O presente trabalho consistiu na primeira fase, numa pesquisa sobre os estudos desenvolvidos e funcionamento de um sistema sifónico. Dessa pesquisa, foi possível inteirar acerca de estudos já efetuados, relativos à colmatação de ralos sifónicos. Entre eles:

- i. Funcionamento em eventos de chuvadas extraordinárias;
- ii. Efeitos da colmatação de sistemas sifónicos de drenagem;
- iii. Sistemas sifónicos *versus* sistemas tradicionais;
- iv. Sistemas de um só ralo *versus* sistemas de múltiplos ralos.

Numa segunda fase, houve o cuidado em perceber como se poderiam realizar os ensaios experimentais na instalação experimental montada no laboratório do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro. Houve a necessidade de efetuar algumas modificações e melhoramentos à instalação existente. Procedeu-se à instalação de equipamento para captação de imagens dos ensaios no tanque da cobertura para posterior visionamento. Definiram-se os caudais em estudo ($0,8 \times Q_0$, Q_0 , $1,2 \times Q_0$ e $1,4 \times Q_0$), as formas (colmatação lateral, colmatação lateral + topo e colmatação no topo) e percentagens de colmatação (de 10% a 100).

A terceira fase assentou na realização dos ensaios. Apurou-se que o caudal de escoamento máximo do ralo sifónico são 2,9 l/s. Realizaram-se, ao todo, mais de 390 ensaios para os quatro caudais, nas várias percentagens e formas de colmatação definidas.

Apresentam-se de seguida as principais conclusões dos resultados obtidos deste trabalho:

- i. O caudal máximo de escoamento Q_0 do sistema sifónico instalado é de 2,9 l/s. Um caudal 3,45% mais baixo que valor de 3,00 l/s indicado pelo fabricante.
- ii. Considera-se como indiferente para a eficiência do escoamento, a divisão da colmatação lateral do ralo sifónico em frações ou numa tira contínua.

- iii. Os quatro caudais em estudo demonstram um aumento das alturas de água com o aumento da percentagem de colmatação.
- iv. Característica comum a todos os caudais, existem três grupos de linhas de altura de água com crescimento ou comportamento semelhante. O primeiro grupo, da percentagem de colmatação de 10% à de 85%. Após um salto nas alturas de água, um segundo grupo das percentagens de colmatação de 90% a 95% com comportamento e crescimento distinto do anterior. E por fim as duas últimas percentagens de colmatação, 97,5% e 100% que apresentam um comportamento geralmente semelhante entre si.
- v. Coincidente com o estudo de Beattie (2013) e Beattie *et al.* (2011, 2012), a percentagem de colmatação de 85% é aquela a partir da qual o escoamento começa a ser afetado e o efeito sifónico por vezes não atingido. Comprova-se igualmente que baixas percentagens de colmatação praticamente não exercem influência no escoamento ou perda de pressão na tubagem de drenagem.
- vi. Verifica-se que por si só, a colmatação no topo do ralo sifónico não exerce influência na drenagem de água. O escoamento continua a ser efetuado lateralmente e o efeito sifónico é atingido em pleno nos caudais que o permitem.
- vii. Comprova-se que para cada percentagem de colmatação lateral, o facto de se colmatar também o topo do ralo terá influência no caudal escoado. Torna-se mais notória esta influência em percentagens de colmatação mais elevadas onde após o escoamento se deixar de efetuar lateralmente, ainda pode ser parcialmente drenado pelas aberturas no topo do ralo sifónico.

6.2 Desenvolvimentos futuros

O número de caudais e percentagens de colmatação abordados nesta dissertação foi elevado. Considera-se que desta forma é proporcionada uma visão global do funcionamento do ralo sifónico quando colmatado parcialmente e para diferentes caudais. No entanto, porque não foi possível aprofundar alguns dos temas, ficam em aberto diversos aspetos que interessará desenvolver em futuros trabalhos.

No decorrer do trabalho desenvolvido, sentiram-se constrangimentos relativos a limitações na instalação experimental. Refere-se nomeadamente a incapacidade da medição direta do

caudal escoado pelo ralo sifónico e o início da captação de imagens sincronizado com o arranque de funcionamento da bomba de água que permita ensaios standardizados. São necessários dispositivos adicionais de forma a nivelar a superfície livre da água.

Sugere-se o estudo aprofundado de um só caudal e do escoamento na tubagem a jusante do ralo sifónico. Assim, poder-se-ia medir efetivamente o caudal escoado pelo ralo. Implicaria a alteração da geometria da torre hidráulica, da instalação de electroválvulas programáveis e de caudalímetros na tubagem de drenagem. Levaria a um estudo mais aproximado do real desempenho do ralo sifónico.

Seria importante efetuar o mesmo estudo deste trabalho, aplicado a um sistema tradicional de drenagem. Poder-se-iam assim comparar os desempenhos dos dois tipos de sistemas de drenagem pluvial, para as mesmas percentagens de colmatção.

Interessaria aplicar o mesmo estudo a ralos sifónicos já instalados em edifícios. Poder-se-ia assim fazer uma correspondência dos resultados obtidos neste trabalho com resultados de uma instalação real.

Por último, dever-se-ia fazer o estudo teórico do caudal debitado pela bomba de água. Dessa forma comprova-se pela teoria os valores lidos pelos equipamentos de medição e afere-se o erro cometido.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Arnbjerg-Nielsen, K., Willems, P., *et al.* (2013). "Impacts of climate change on rainfall extremes and urban drainage systems: a review". *Water Science & Technology*, 68(1), 13-28.

Arthur, S. e Swaffield, J. A. (1999a). "Numerical modelling of the priming of a siphonic rainwater drainage system". *Building Services Engineering Research and Technology*, 20(2), 83-91.

Arthur, S. e Swaffield, J. A. (1999b). "Understanding Siphonic Rainwater Drainage Systems", atas do CIBW62 Symposium in Water Supply And Drainage For Buildings, Edinburgo (Escócia).

Arthur, S. e Swaffield, J. A. (2001a). "Siphonic roof drainage system analysis utilising unsteady flow theory". *Building and Environment*, 36(2001), 939-948.

Arthur, S. e Swaffield, J. A. (2001b). "Siphonic roof drainage: current understanding". *Urban Water*, 3(2001), 43-52.

Arthur, S., Wright, G. B., *et al.* (2005). "Operational performance of siphonic roof drainage systems". *Building and Environment*, 40(2005), 788-796.

Beattie, R. K. (2013). "The effect of weather and climate on siphonic rainwater drainage system operation", Tese de doutoramento, Heriot-Watt University.

Beattie, R. K. e Jack, L. B. (2011). "An investigation into how siphonic roof drainage systems perform in a future climate", atas do 37º International Symposium CIBW62 on Water Supply and Drainage for Buildings, Aveiro (Portugal).

Beattie, R. K. e Jack, L. B. (2012). "Investigation of outlet detritus accumulation at two different siphonic roof drainage sites", atas do CIBW62 Symposium 2012, Edinburgo (Escócia).

Bramhall, M. e Wearing, M. J. (2008). "Siphonic roof drainage systems - Priming of tailpipes", atas do 11º International Conference on Urban Drainage, Edinburgo (Escócia).

Campbell, D. P. (2013). "Investigation of a Flow Modulation System for Siphonic Roof Drainage Systems". *Journal of Water Resource and Protection*, 5(2013), 546-554.

Campbell, D. P. (2014). "Novel modulated flow, self configuring, siphonic roof drainage system". *Building Services Engineering Research and Technology*, 35(4), 349-361.

Geberit Tecnologia Sanitária, S. A. (2005a) "Geberit Mepla - Catálogo de produto". Lisboa, 4 p.

Geberit Tecnologia Sanitária, S. A. (2005b) "Torre Hidráulica da Universidade de Aveiro", 24 p.

Grundfos (2016) "Wastwater pumps 50 Hz - Catálogo de produto". Reino Unido, 96 p.

Jack, L. B. (2008). "Assessing the impact upon property-based water supply and drainage systems of rainfall events predicted by climate change scenarios", atas do CIBW62 Water supply and drainage for buildings - Annual meeting 2008, Roterdão (Holanda).

Jack, L. B. e Beattie, R. K. (2014). "The impact of detritus accumulation on the performance of siphonic rainwater outlets". *Building Services Engineering Research and Technology*, 35(2), 214-232.

Jack, L. B. e Kelly, D. A. (2011). "The development of a methodological approach for the use of uk climate change data for the design of rainwater drainage systems for buildings", atas do 37.º International Symposium CIB W062 on Water Supply and Drainage for Buildings, Aveiro (Portugal).

Jack, L. B. e Kelly, D. A. (2012). "Property-based rainwater drainage design and the impacts of climate change". *Building Services Engineering Research and Technology*, 33(1), 19-33.

Kelly, D. A. e Jack, L. B. (2010). "An investigation into the impact of climate change on the performance of property drainage systems", atas do 36.º International Symposium on Water Supply and Drainage for Buildings, Sydney (Austrália).

Kelly, D. A. e Jack, L. B. (2011). "Steps towards a unified design methodology for rainwater drainage systems", atas do 37.º International Symposium CIB W062 on Water Supply and Drainage for Buildings, Aveiro (Portugal).

Kelly, D. A. e Jack, L. B. (2012). "Adaptation of a property-based rainwater drainage system to accommodate climate change impacts", atas do 38.º International Symposium on Water Supply and Drainage for Buildings, Edinburgo (Escócia).

KROHNE (2013) "OPTIFLUX 2000 - Manual de instruções". Reino Unido, 44 p.

Lucke, T. (2011). "Determining Flowrates through Individual Outlets in Siphonic Roof Drainage Systems", atas do 12º International Conference on Urban Drainage, Porto Alegre (Brasil).

Lucke, T. e Beecham, S. (2009). "Cavitation, aeration and negative pressures in siphonic roof drainage systems". Building Services Engineering Research and Technology, 30(2), 103-119.

Lucke, T. e Beecham, S. (2010a). "Aeration and gutter water levels in siphonic roof drainage systems". Building Research & Information, 38(6), 670-685.

Lucke, T. e Beecham, S. (2010b). "Capacity loss in siphonic roof drainage systems due to aeration". Building Research & Information, 38(2), 206-217.

May, R. W. (1997). "The Design of Conventional and Siphonic Roof-Drainage Systems". Water and Environment Journal, 11(1997), 56-60.

Öngören, A. e Materna, R. (2006). "Multi-phase flow characteristics of a siphonic roof drainage system under part load conditions", atas do CIBW62 Symposium 2006, Taipei (Taiwan).

Pereira, J. P. (2012). "Sistemas Prediais Não Tradicionais de Drenagem de Águas Residuais Pluviais", Universidade do Porto.

Qu, Y. Y., Lucke, T., *et al.* (2011). "Measuring Flows in Partially-Filled Pipes in Siphonic Roof Drainage Systems". MAPAN - Journal of Metrology Society of India, 26(4), 315-327.

Ruas, M., Vital, R., *et al.* (2005). "Manual de Engenharia", Bombas Grundfos Portugal.

Silva, A. I. (2014). "Sistemas de Aproveitamento de Águas Pluviais em Habitações Unifamiliares: Funcionamento Hidráulico de um Sistema de Drenagem Sifónica", Universidade do Minho.

Smith, J. R. (2008) "The Fundamentals of Siphonic Roof Drainage System Design". AIA Continuing Education Program, American Institute of Architects, 67 p.

SRDA (2014) "An Introduction to Siphonic Drainage Systems". Siphonic Roof Drainage Association, 4 p.

Valsir (2013) "Rainplus - Sistema de drenagem sifónico de águas pluviais", Valsir, 19 p.

Wright, G. B. (2007). "Roof and local drainage performance under extreme loading conditions", atas do 33.º International Symposium CIBW62 on Water Supply and Drainage for Buildings, Roterdão (Holanda).

Wright, G. B., Arthur, S., *et al.* (2005). "Numerical simulation of the dynamic operation of multi-outlet siphonic roof drainage systems". *Building and Environment*, 41(2006), 1279-1290.

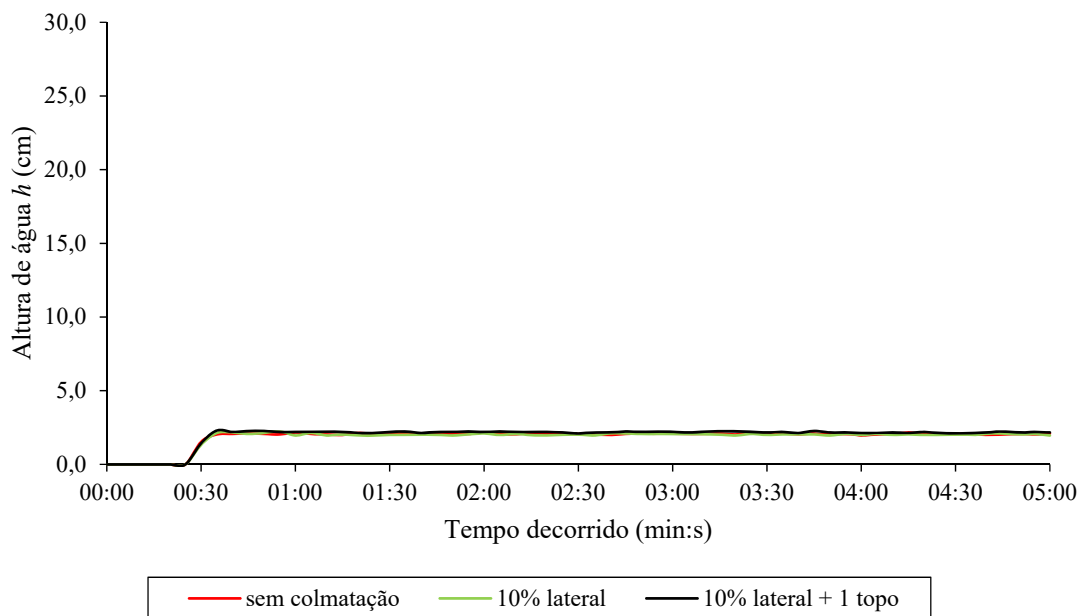
Wright, G. B., Jack, L. B., *et al.* (2006). "Investigation and numerical modelling of roof drainage systems under extreme events". *Building and Environment*, 41(2006), 126-135.

Wright, G. B., Swaffield, J. A., *et al.* (2002). "The performance characteristics of multi-outlet siphonic roof drainage systems". *Building Services Engineering Research and Technology*, 23(3), 127-141.

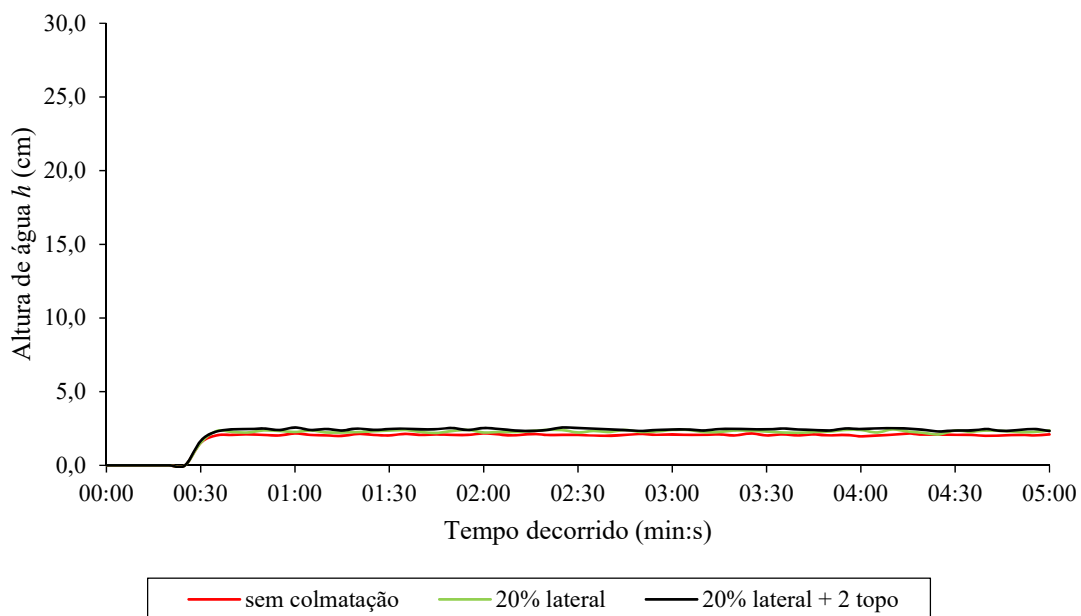
ANEXO 1

ANEXO 1

No presente anexo, encontram-se os valores das alturas de água para todas as percentagens de colmatação, nos quatro caudais ensaiados: $0,8 \times Q_0$, Q_0 , $1,2 \times Q_0$ e $1,4 \times Q_0$.

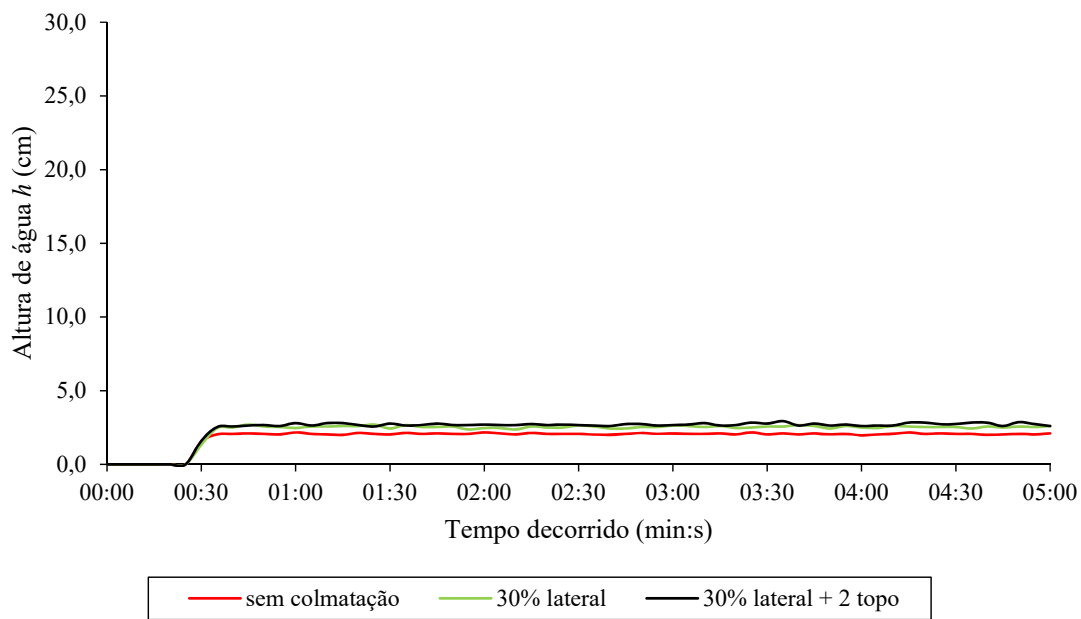


a) Colmatação de 10%

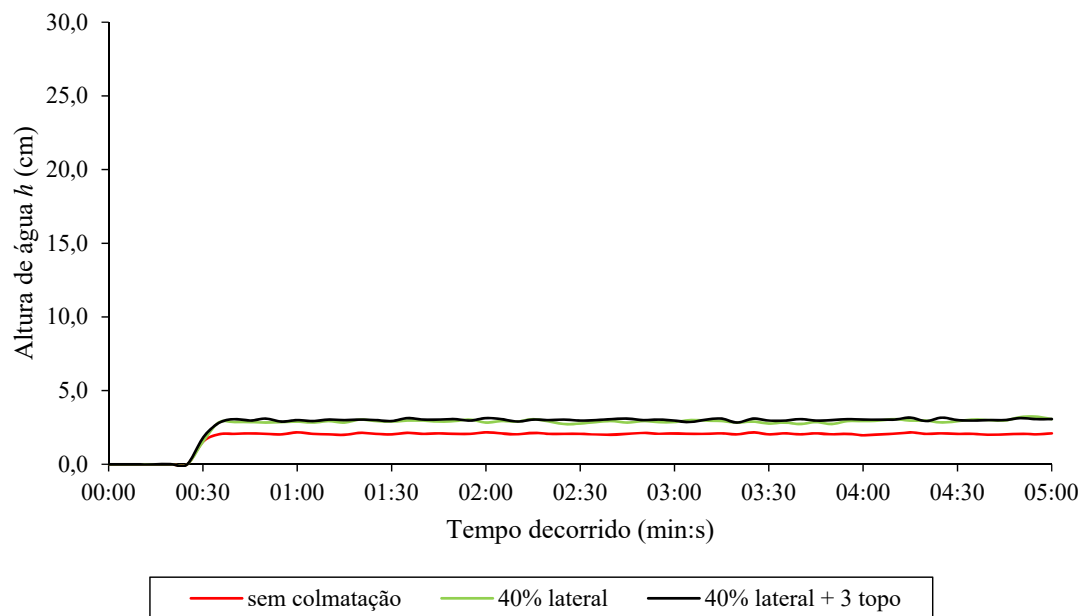


b) Colmatação de 20%

Figura A1.1: Alturas de água dos ensaios efetuados para o caudal $0,8 \times Q_0$.

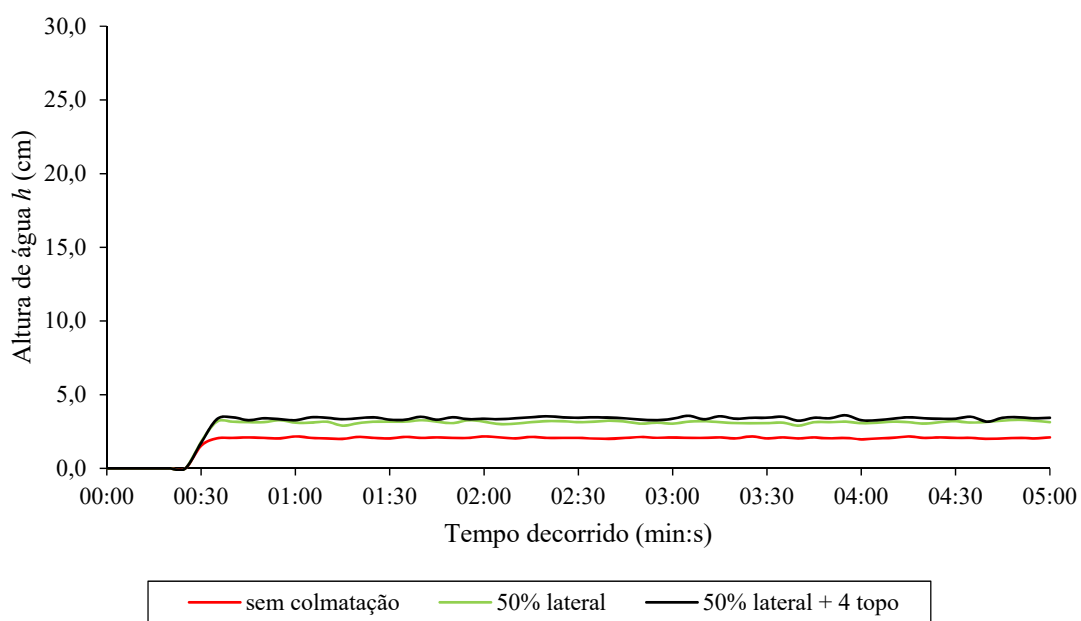


c) Colmatação de 30%

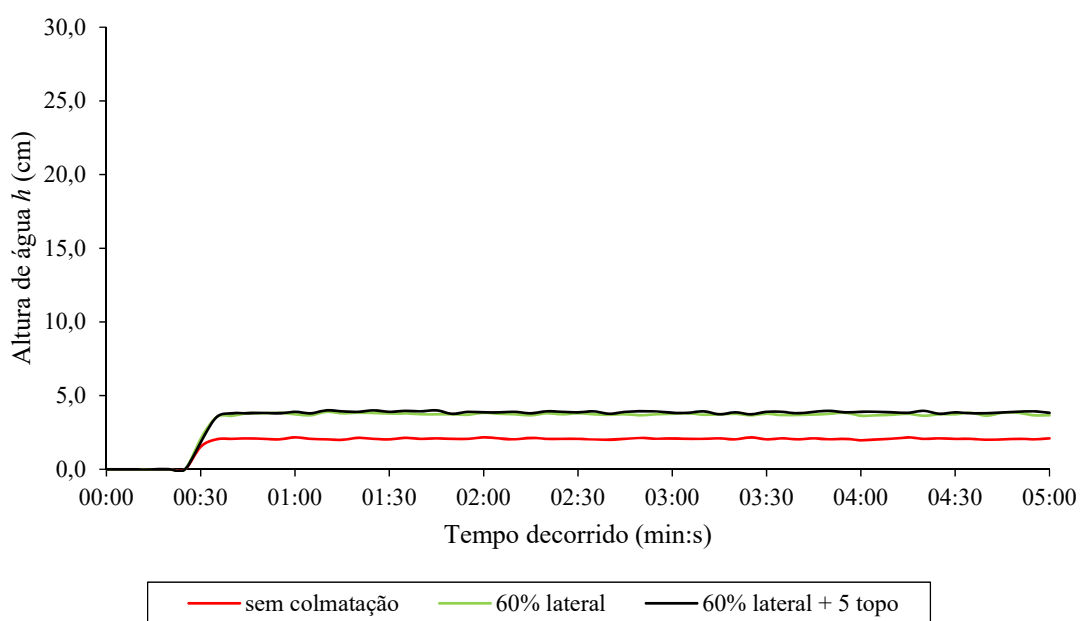


d) Colmatação de 40%

Figura A1.1: Alturas de água dos ensaios efetuados para o caudal $0,8 \times Q_0$ (continuação).

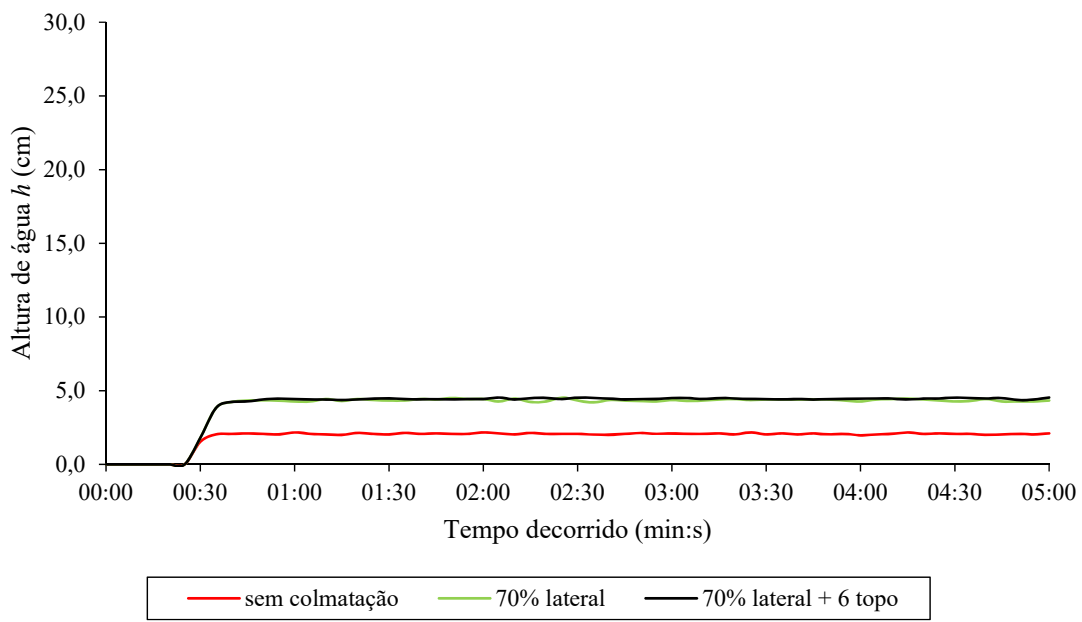


e) Colmatação de 50%

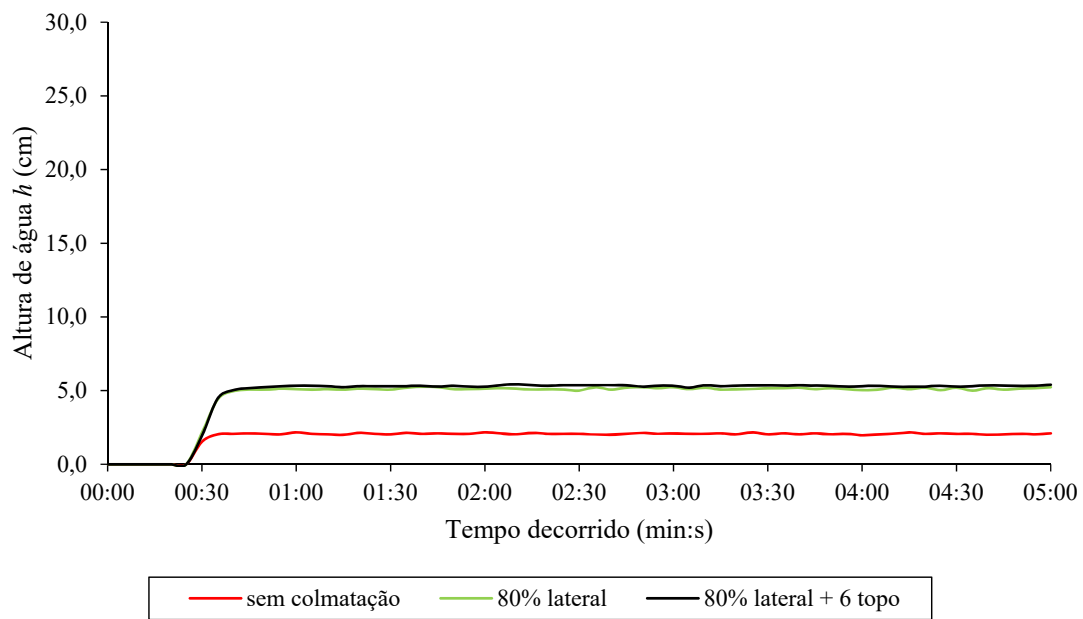


f) Colmatação de 60%

Figura A1.1: Alturas de água dos ensaios efetuados para o caudal $0,8 \times Q_0$ (continuação).

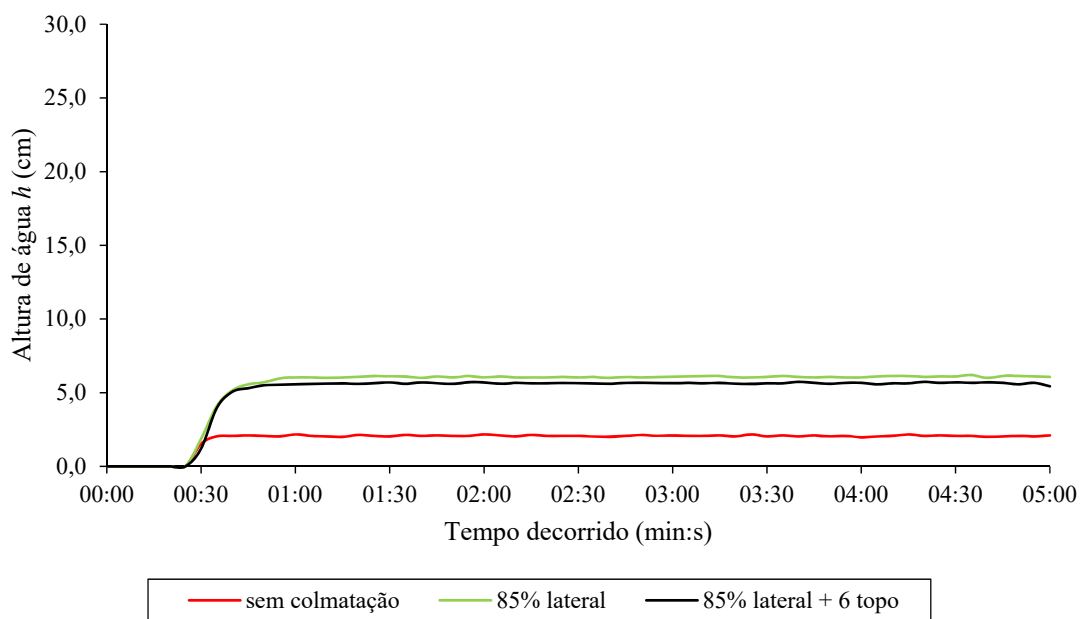


g) Colmatção de 70%

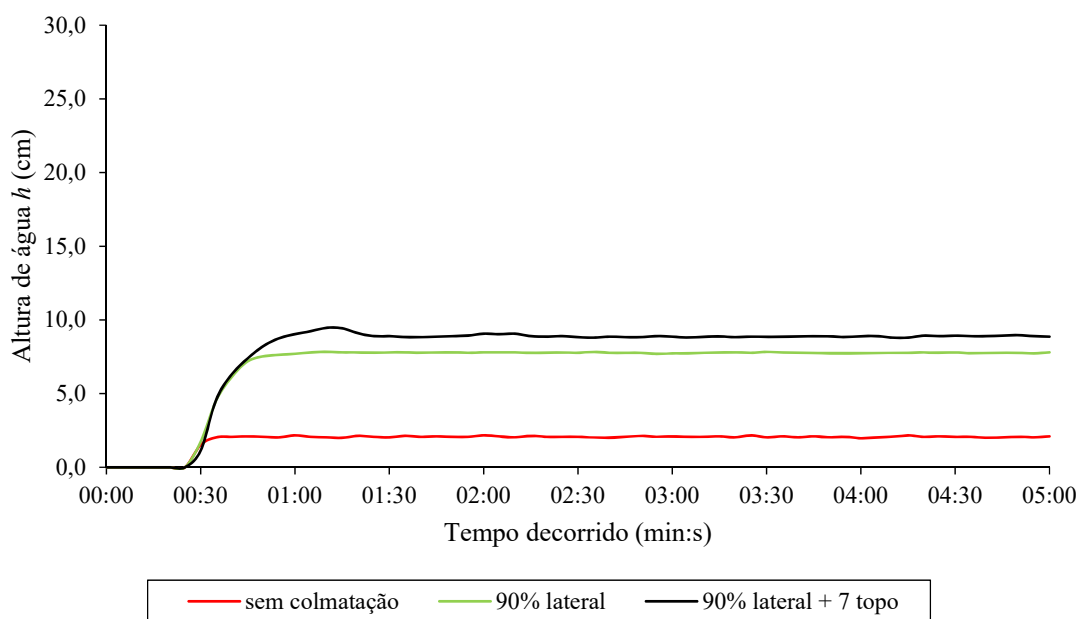


h) Colmatção de 80%

Figura A1.1: Alturas de água dos ensaios efetuados para o caudal $0,8 \times Q_0$ (continuação).

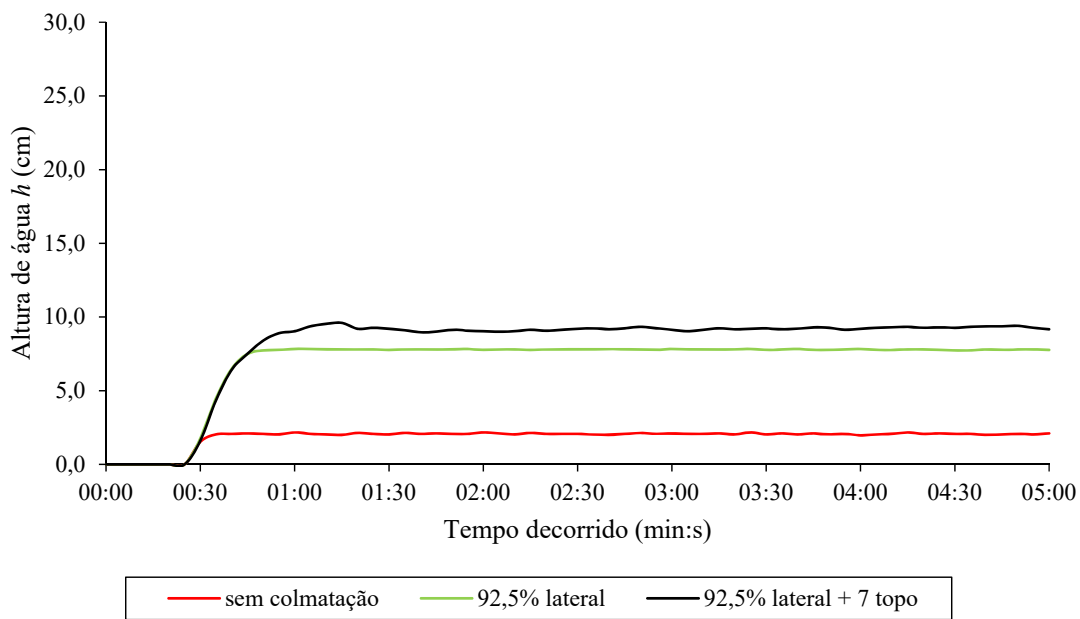


i) Colmatação de 85%

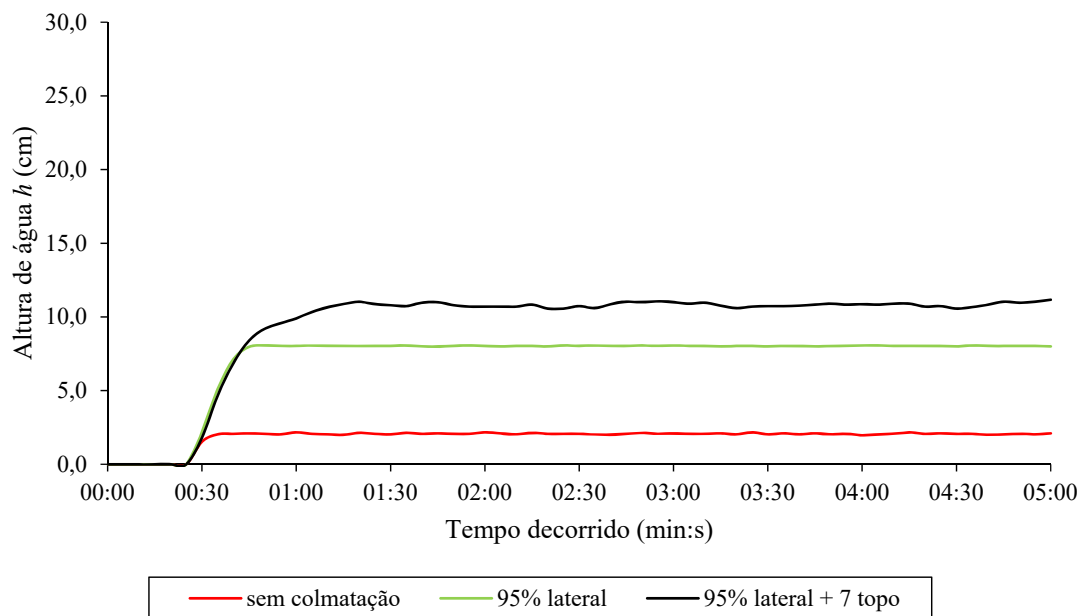


j) Colmatação de 90%

Figura A1.1: Alturas de água dos ensaios efetuados para o caudal $0,8 \times Q_0$ (continuação).

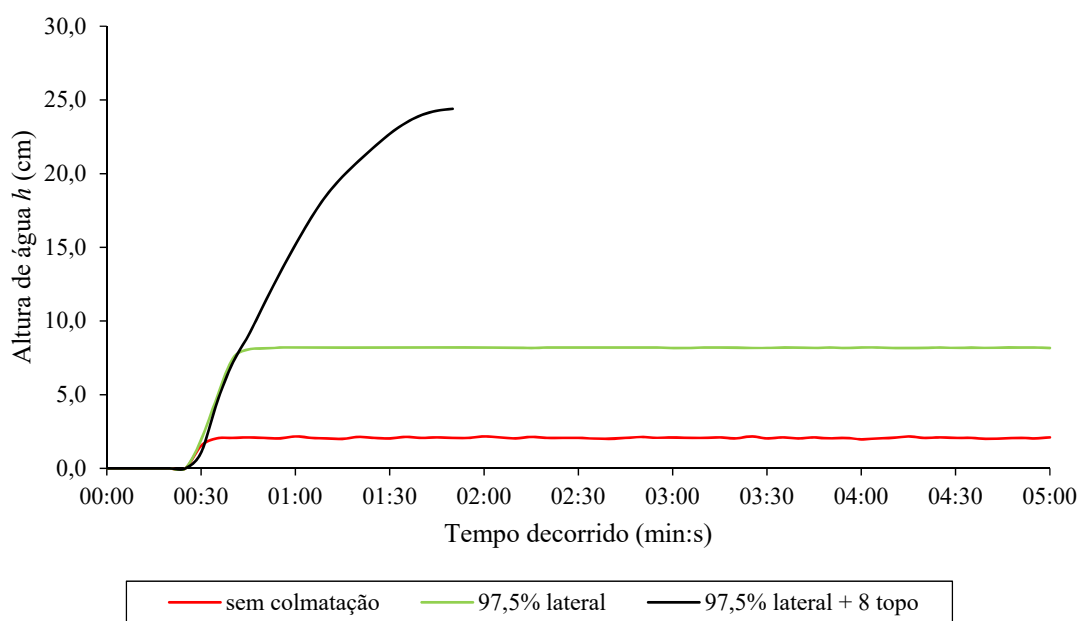


k) Colmatção de 92,5%

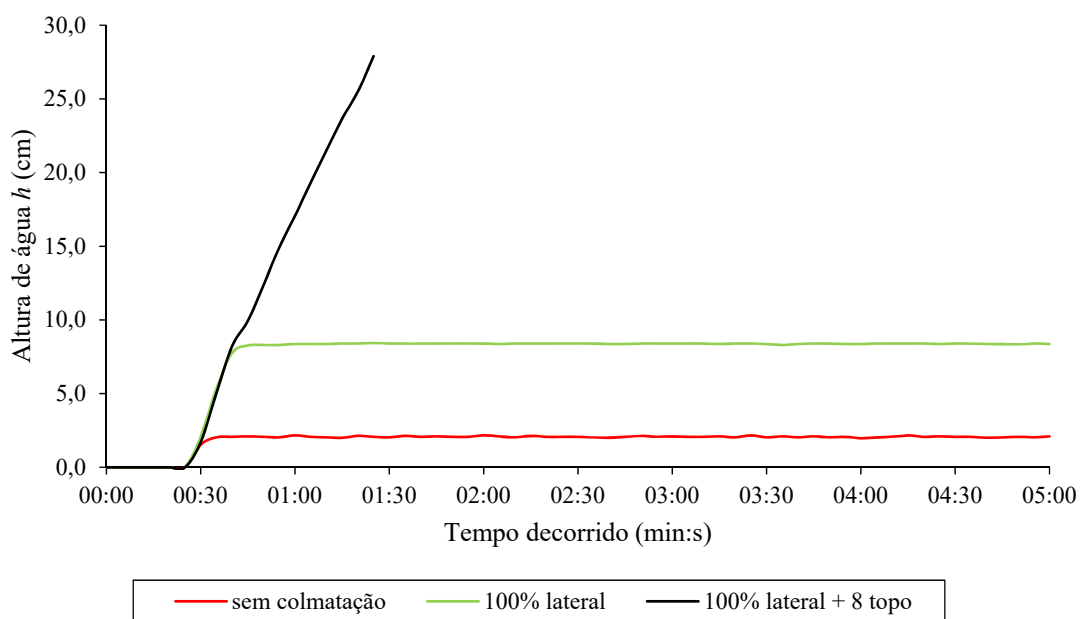


l) Colmatção de 95%

Figura A1.1: Alturas de água dos ensaios efetuados para o caudal $0,8 \times Q_0$ (continuação).

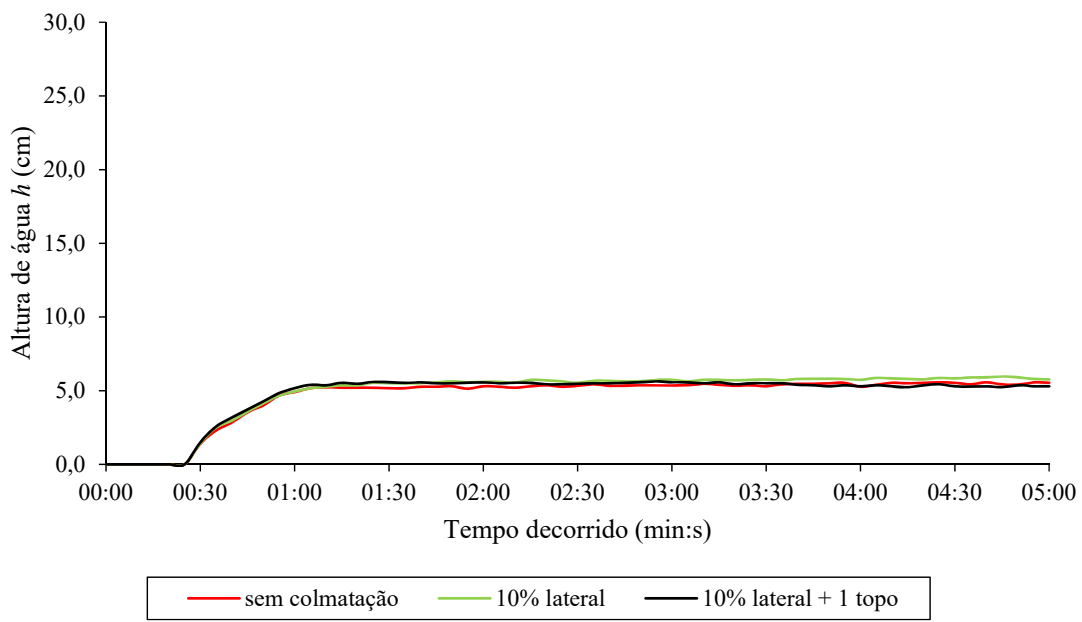


m) Colmatação de 97,5%

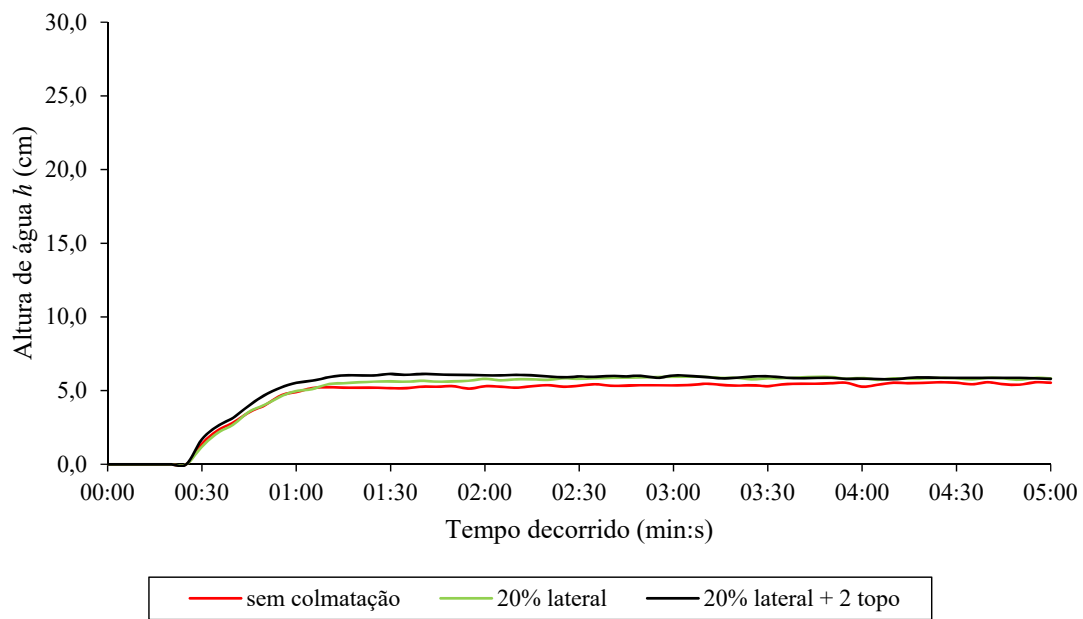


n) Colmatação de 100%

Figura A1.1: Alturas de água dos ensaios efetuados para o caudal $0,8 \times Q_0$ (continuação).

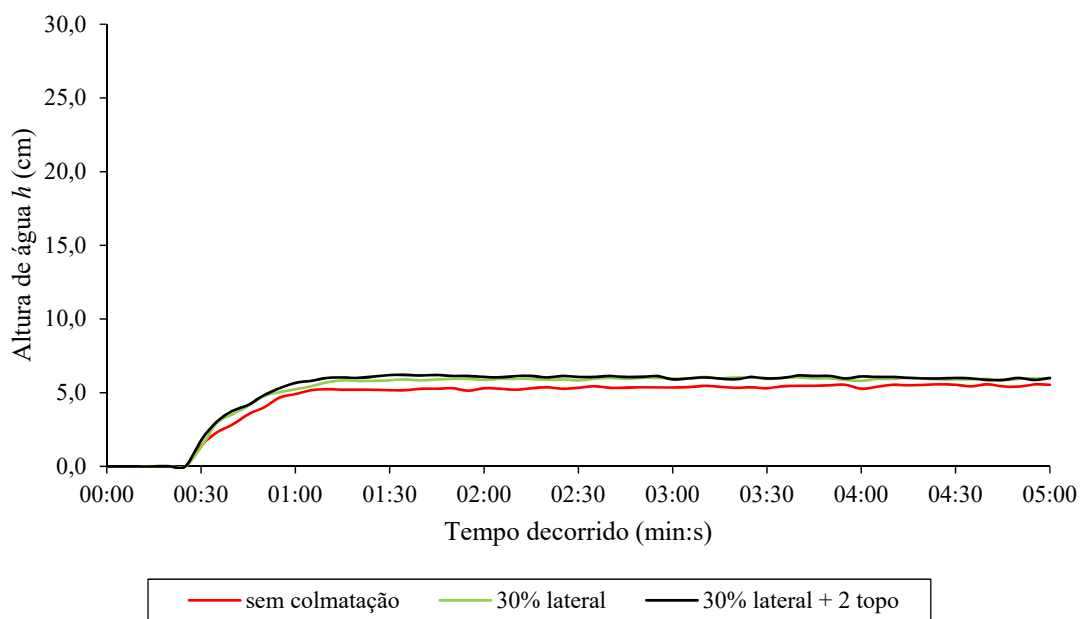


a) Colmatção de 10%

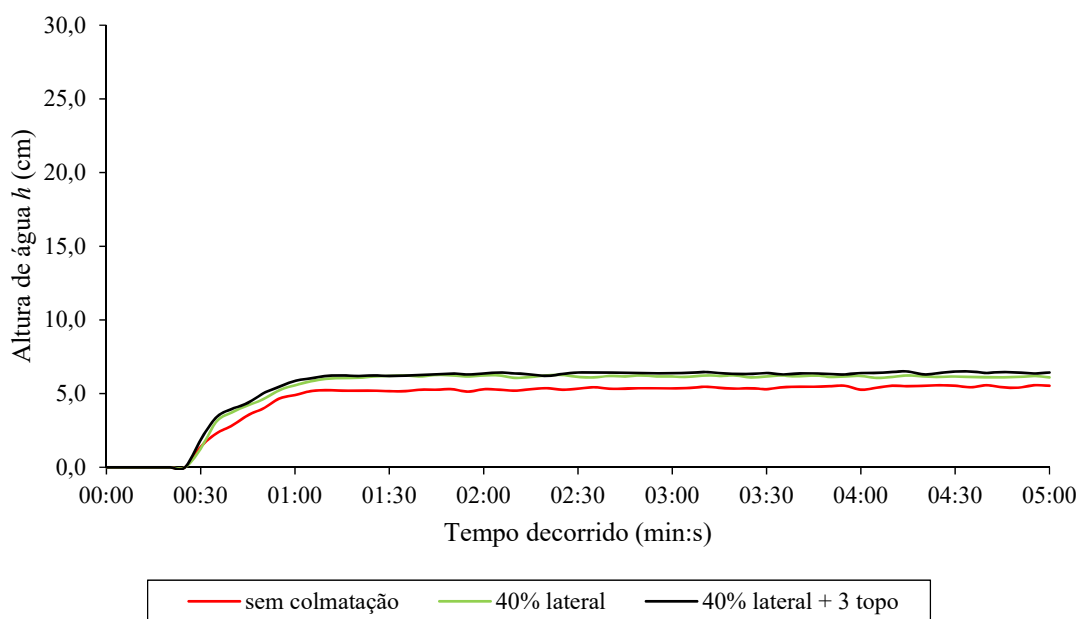


b) Colmatção de 20%

Figura A1.2: Alturas de água dos ensaios efetuados para o caudal Q_0 .

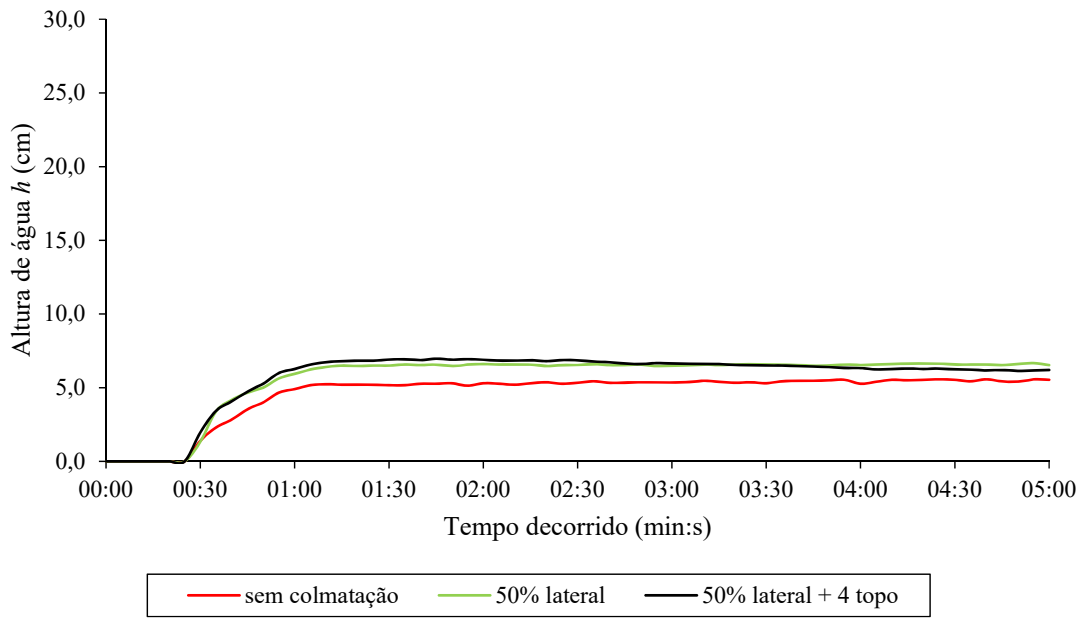


c) Colmatação de 30%

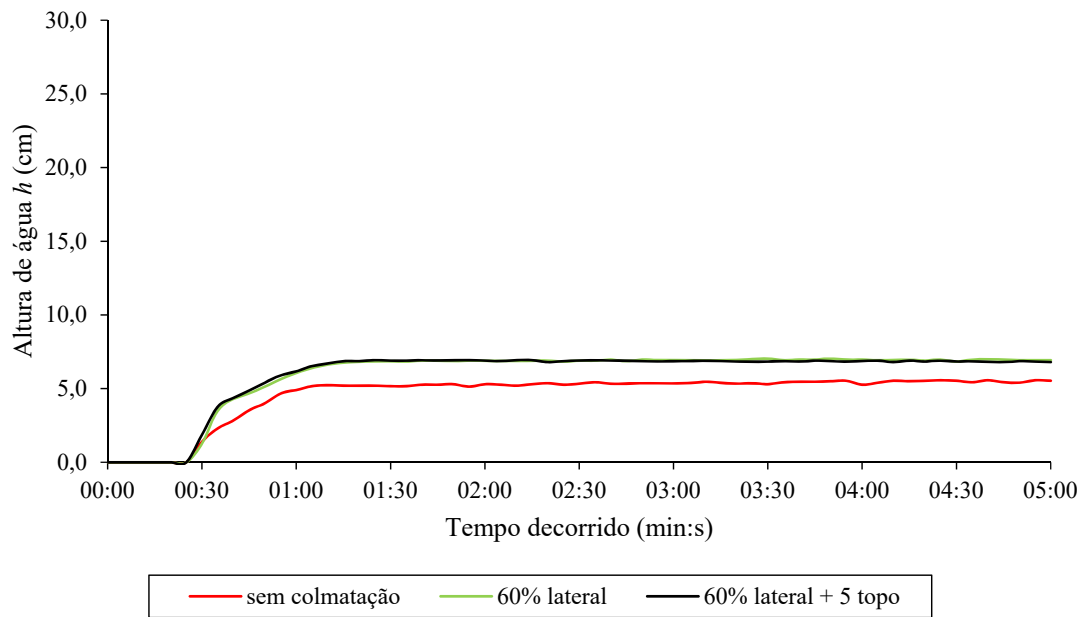


d) Colmatação de 40%

Figura A1.2: Alturas de água dos ensaios efetuados para o caudal Q_0 (continuação).

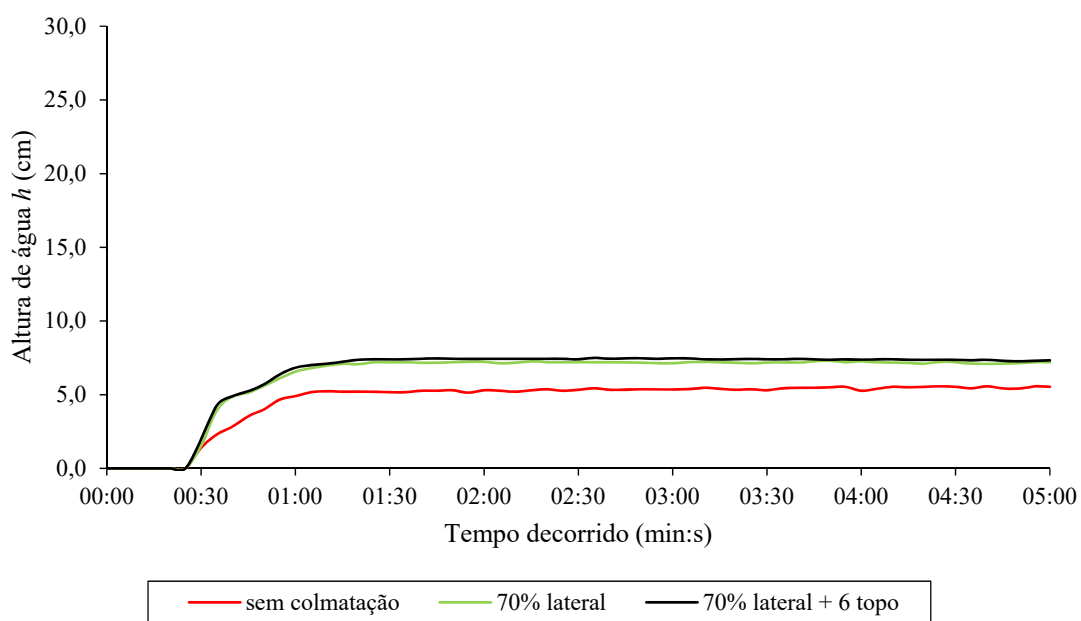


e) Colmatção de 50%

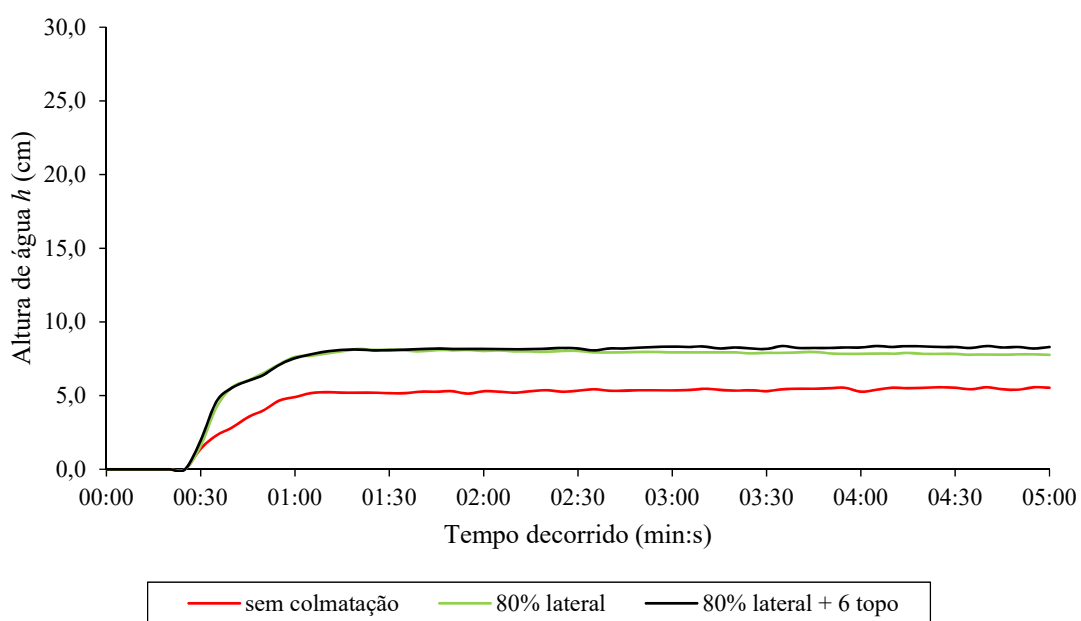


f) Colmatção de 60%

Figura A1.2: Alturas de água dos ensaios efetuados para o caudal Q_0 (continuação).

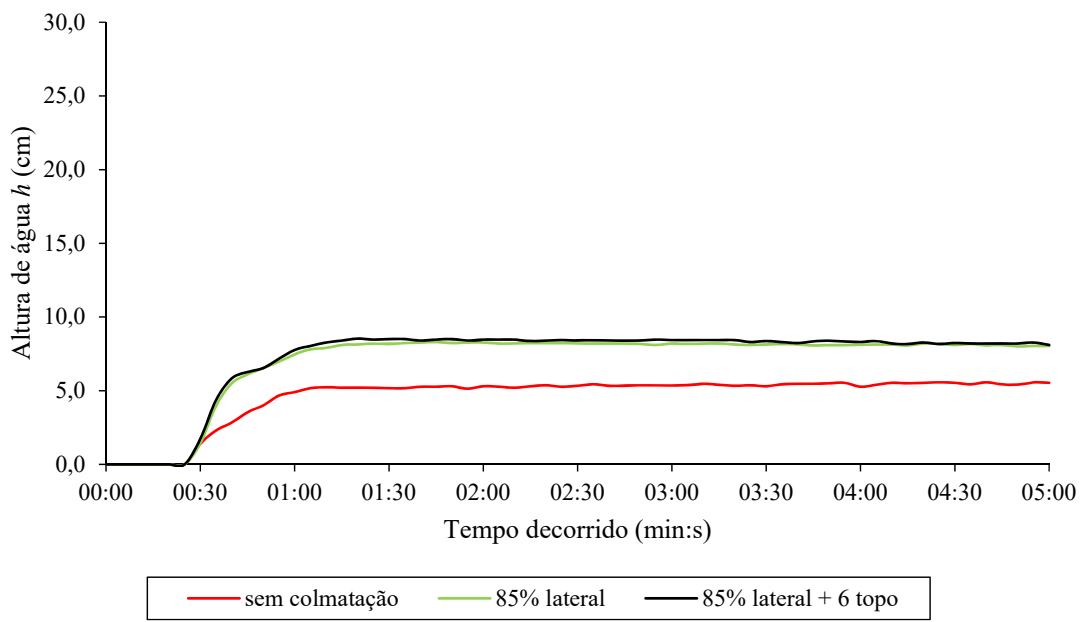


g) Colmatação de 70%

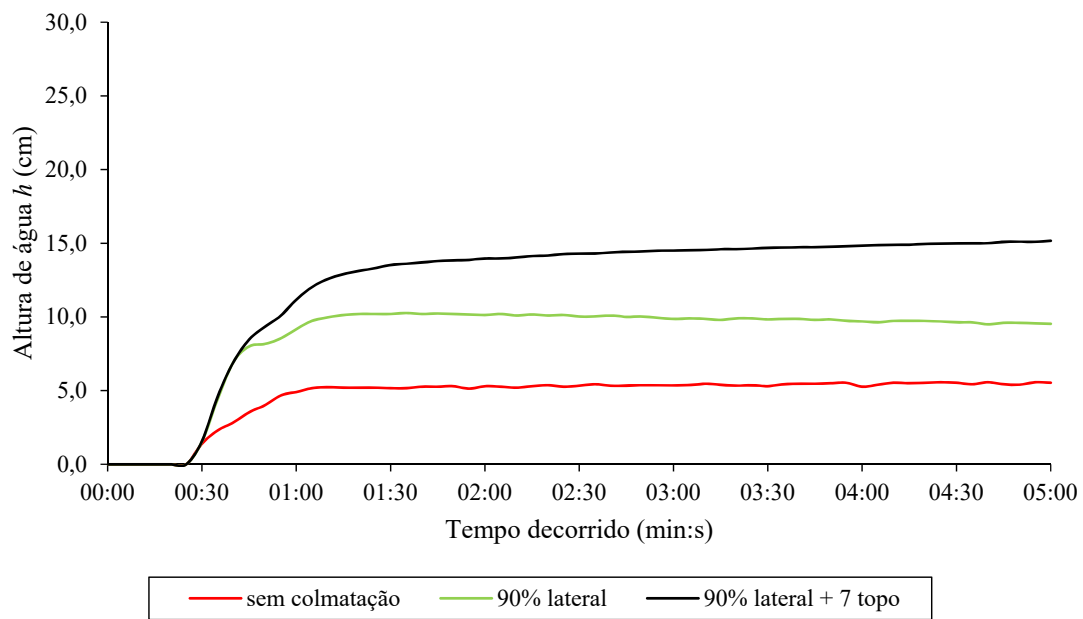


h) Colmatação de 80%

Figura A1.2: Alturas de água dos ensaios efetuados para o caudal Q_0 (continuação).

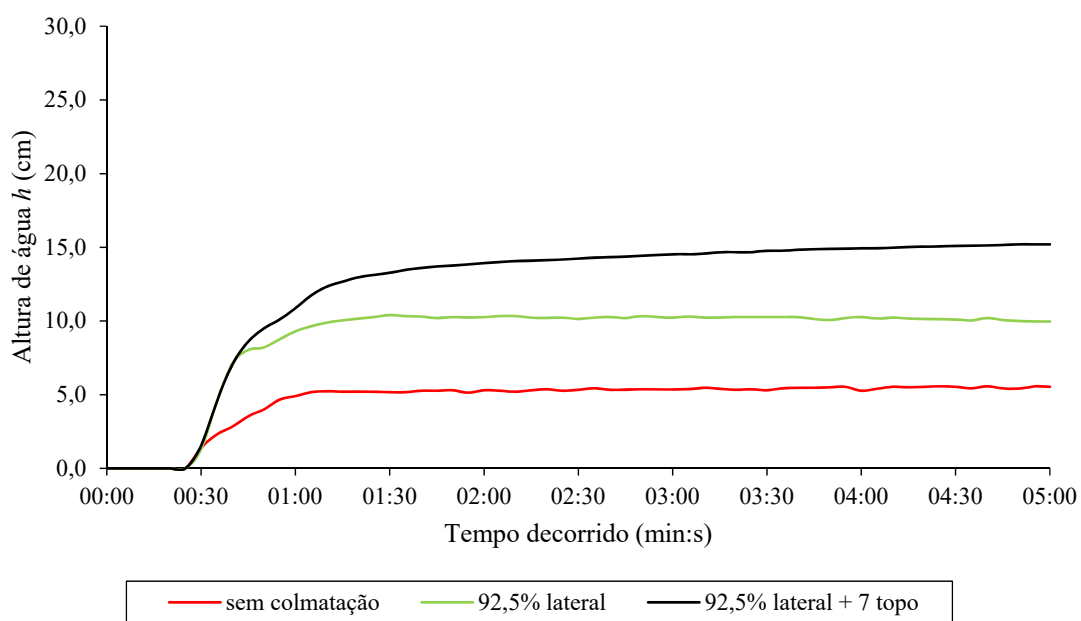


i) Colmatção de 85%

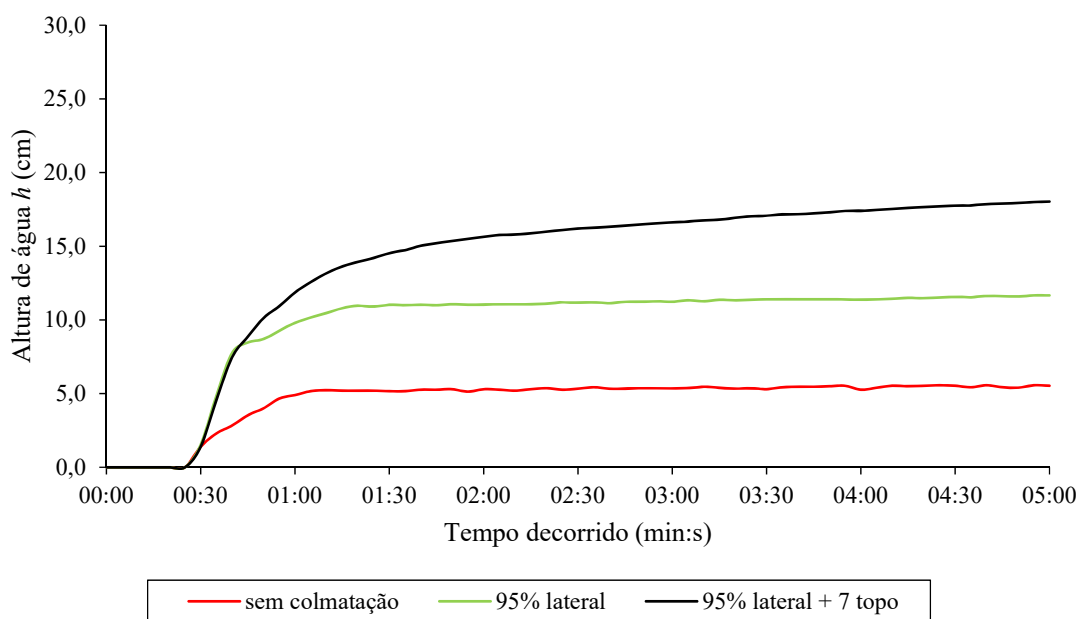


j) Colmatção de 90%

Figura A1.2: Alturas de água dos ensaios efetuados para o caudal Q_0 (continuação).

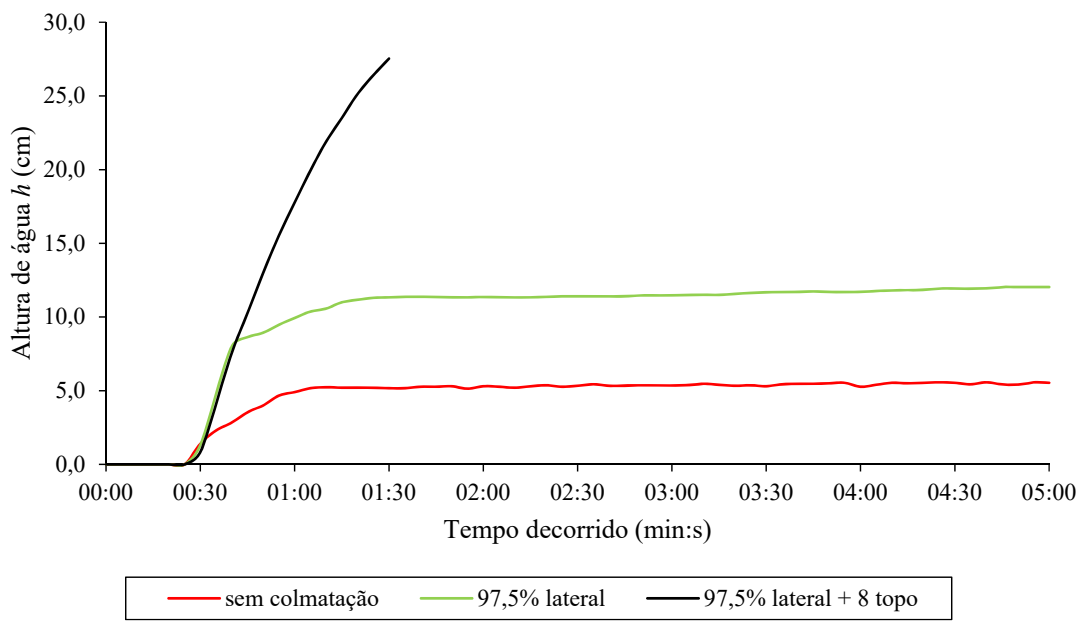


k) Colmatação de 92,5%

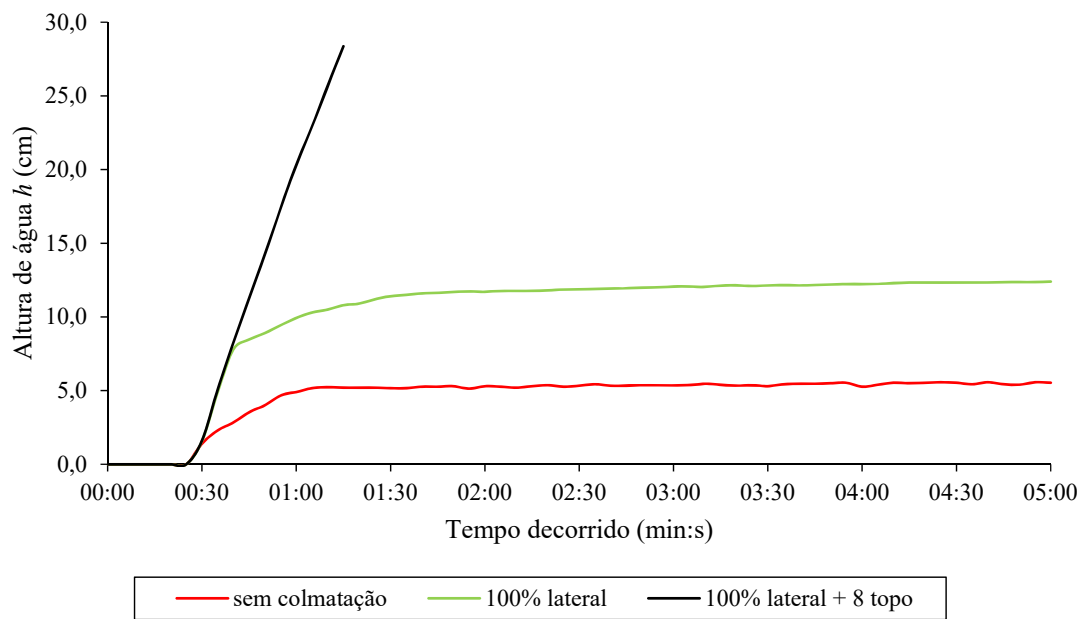


l) Colmatação de 95%

Figura A1.2: Alturas de água dos ensaios efetuados para o caudal Q_0 (continuação).

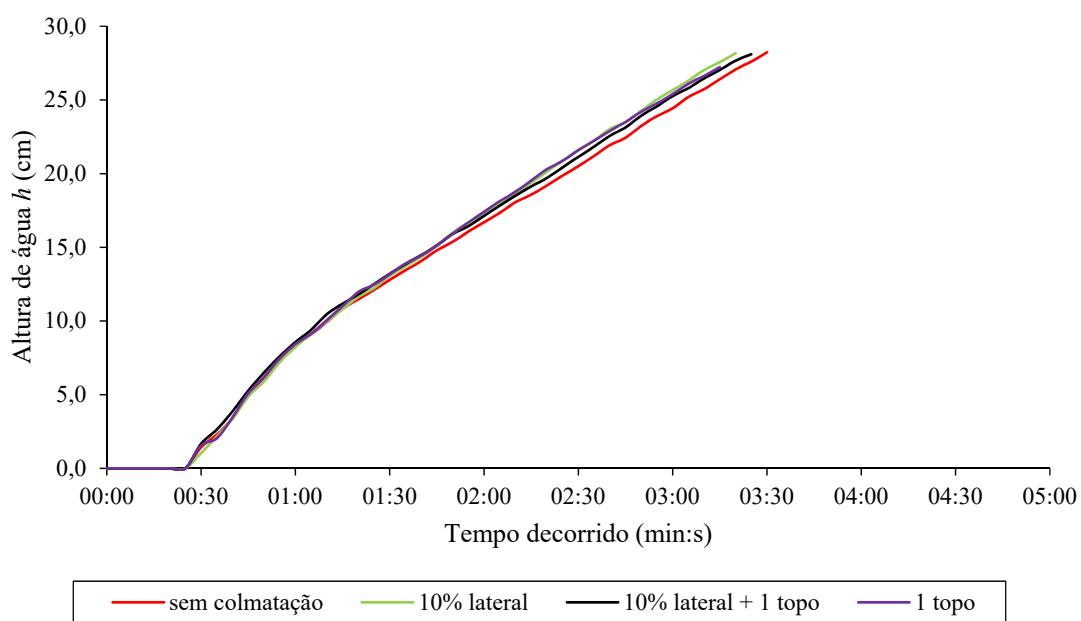


m) Colmatação de 97,5%

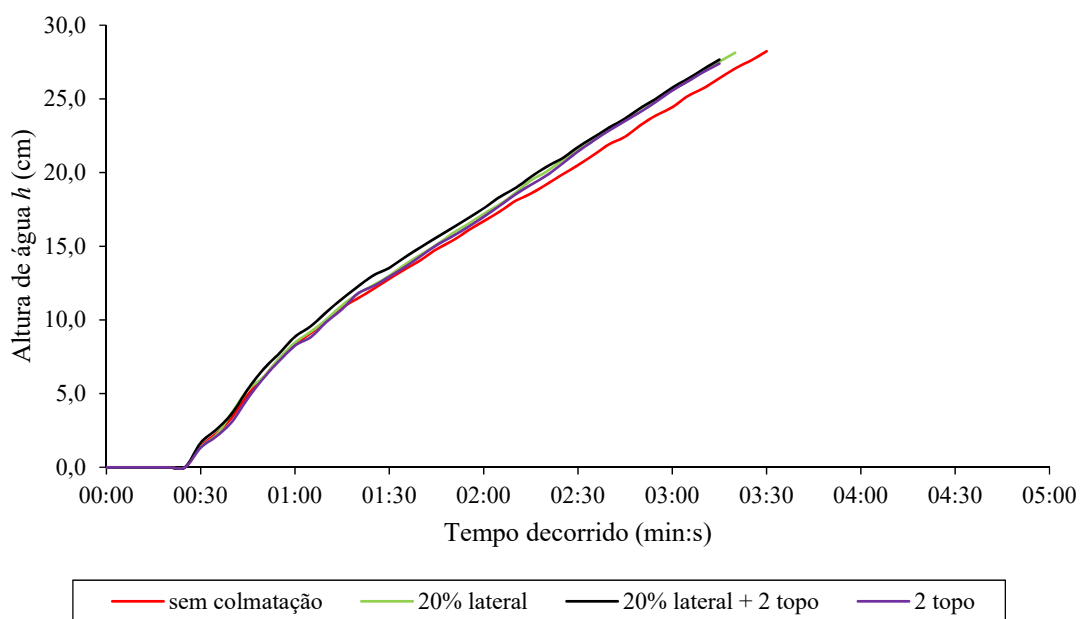


n) Colmatação de 100%

Figura A1.2: Alturas de água dos ensaios efetuados para o caudal Q_0 (continuação).

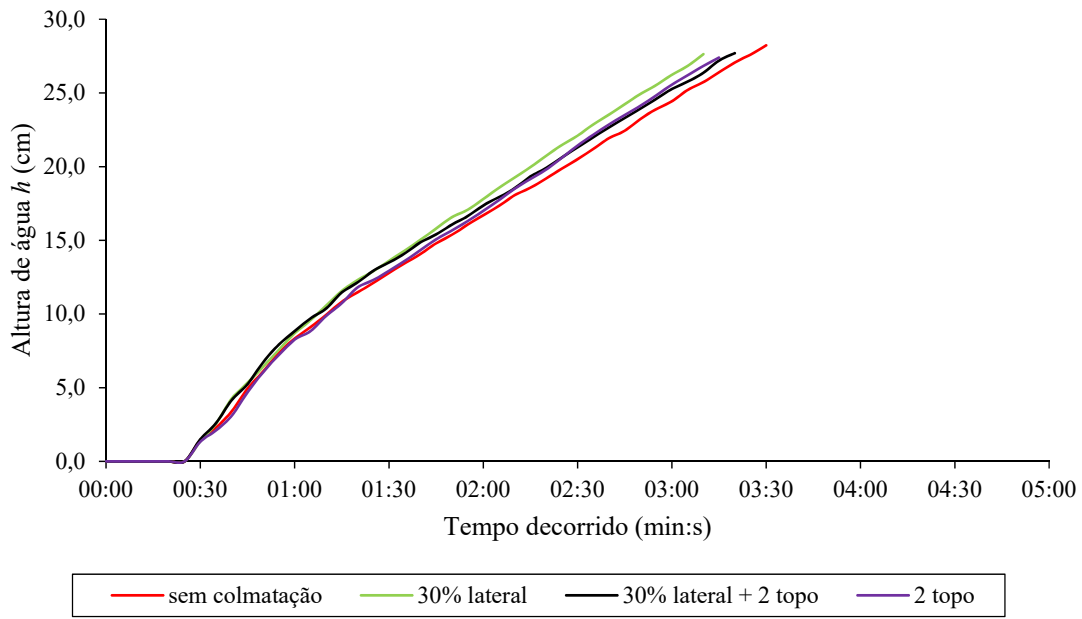


a) Colmatação de 10%

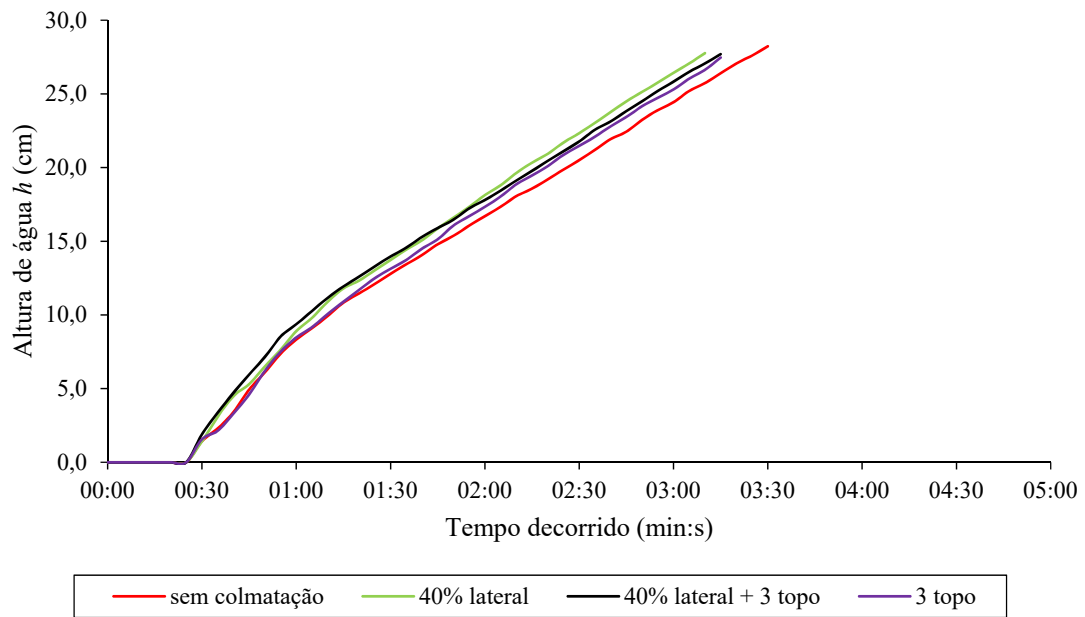


b) Colmatação de 20%

Figura A1.3: Alturas de água dos ensaios efetuados para o caudal $1,2 \times Q_0$.

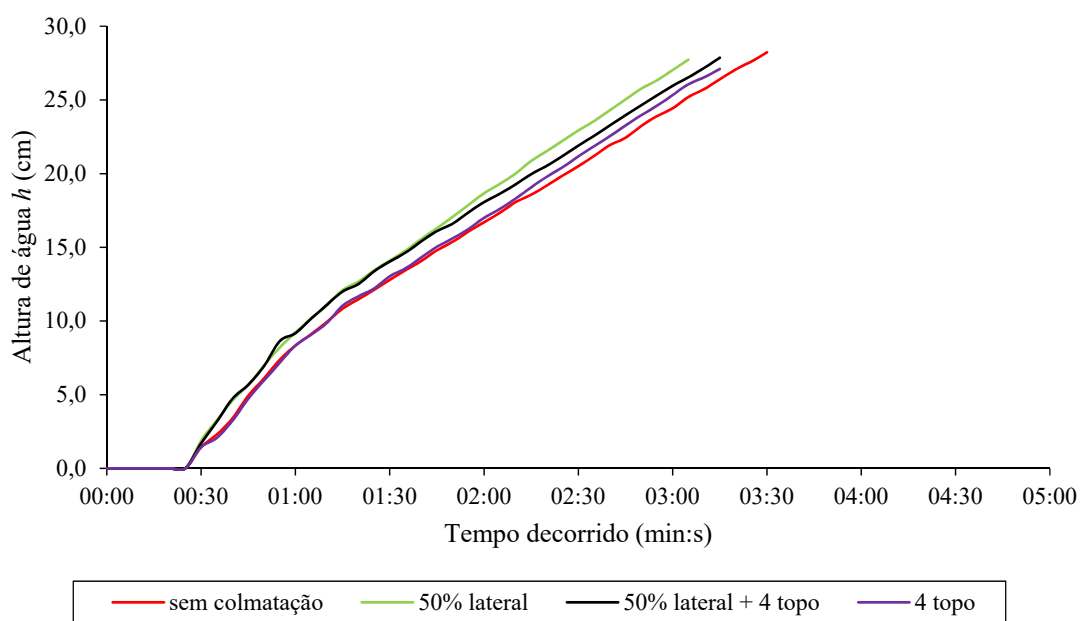


c) Colmatção de 30%

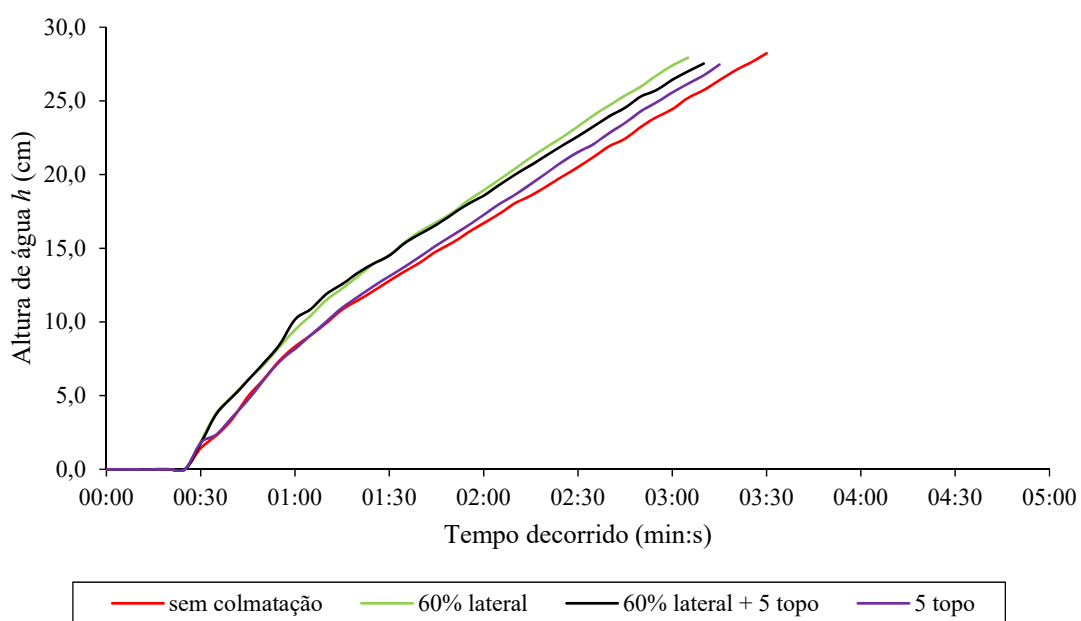


d) Colmatção de 40%

Figura A1.3: Alturas de água dos ensaios efetuados para o caudal $1,2 \times Q_0$ (continuação).

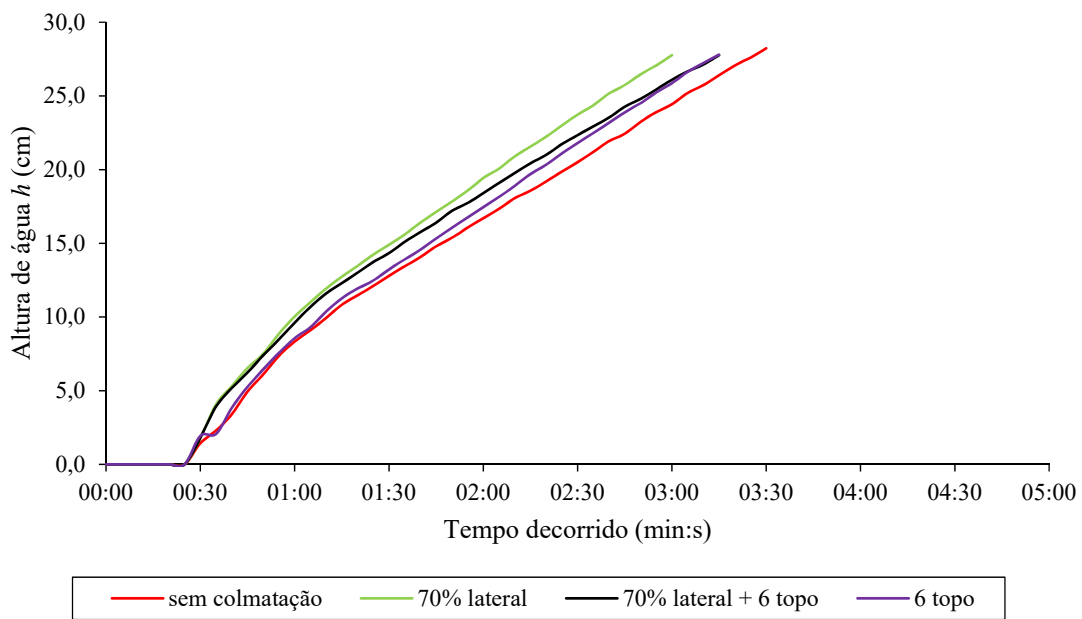


e) Colmatação de 50%

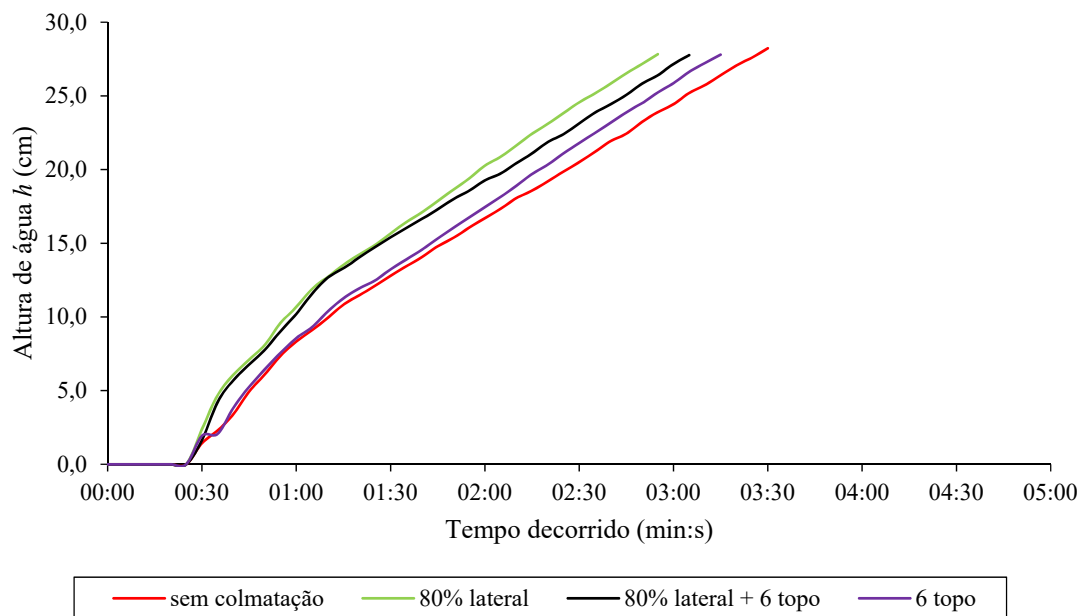


f) Colmatação de 60%

Figura A1.3: Alturas de água dos ensaios efetuados para o caudal $1,2 \times Q_0$ (continuação).

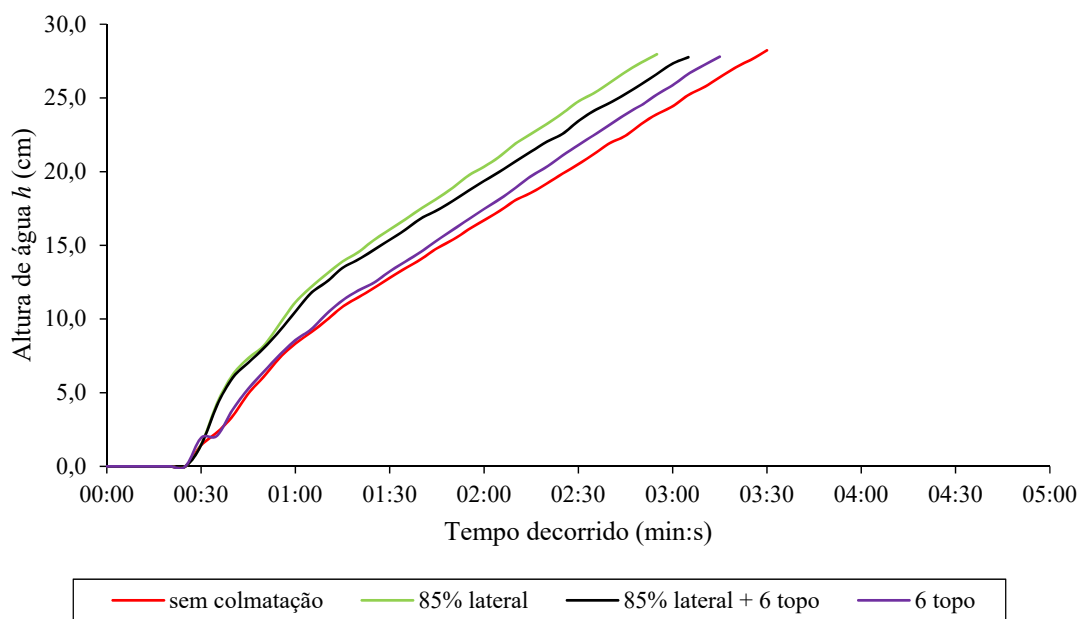


g) Colmatação de 70%

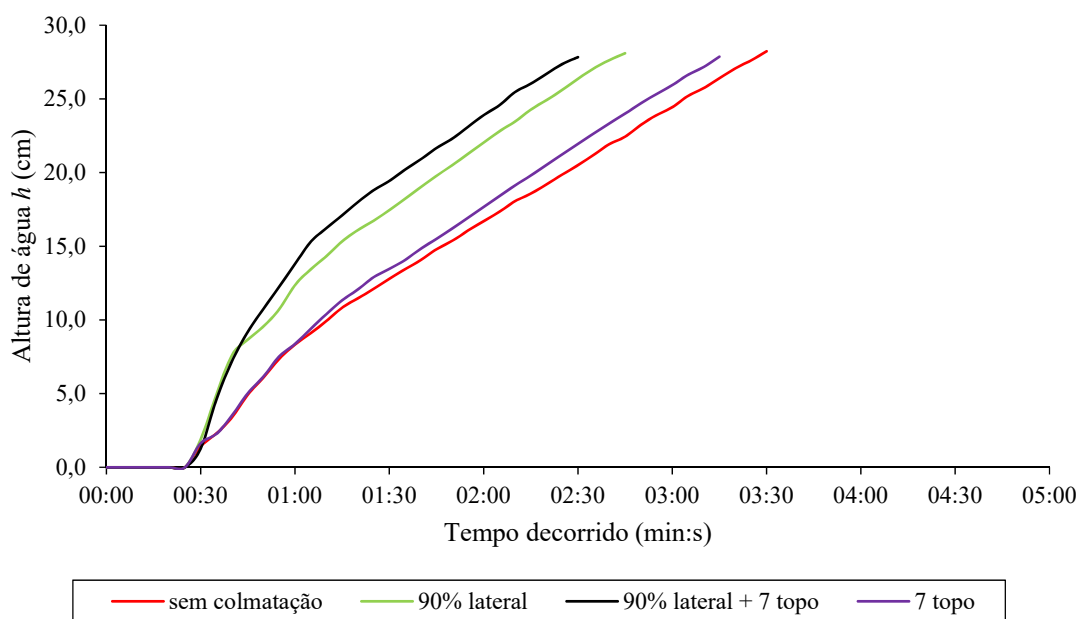


h) Colmatação de 80%

Figura A1.3: Alturas de água dos ensaios efetuados para o caudal $1,2 \times Q_0$ (continuação).

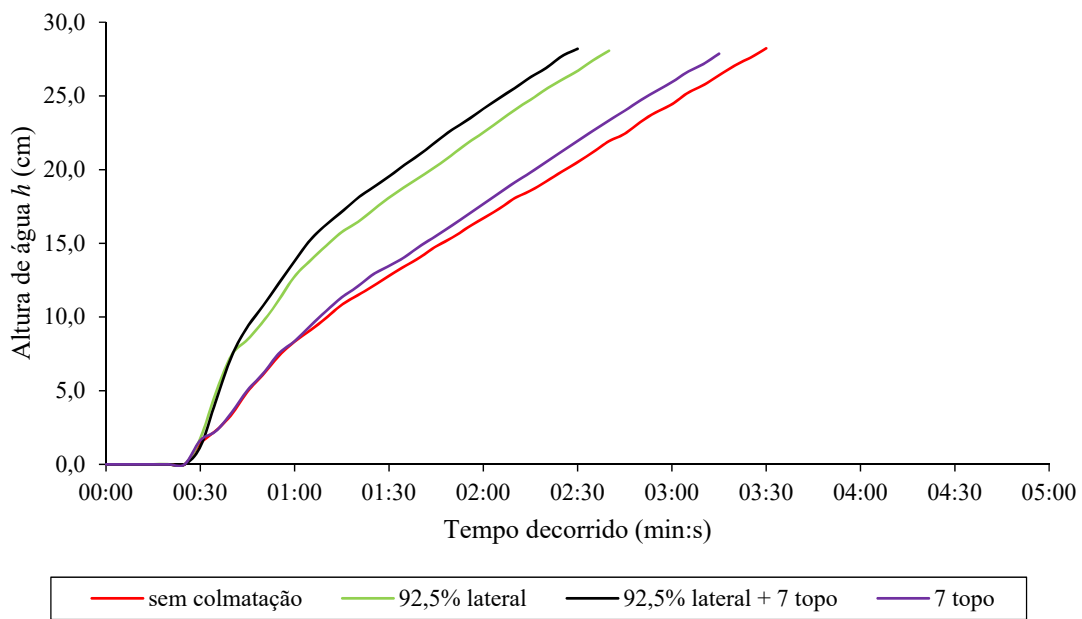


i) Colmatação de 85%

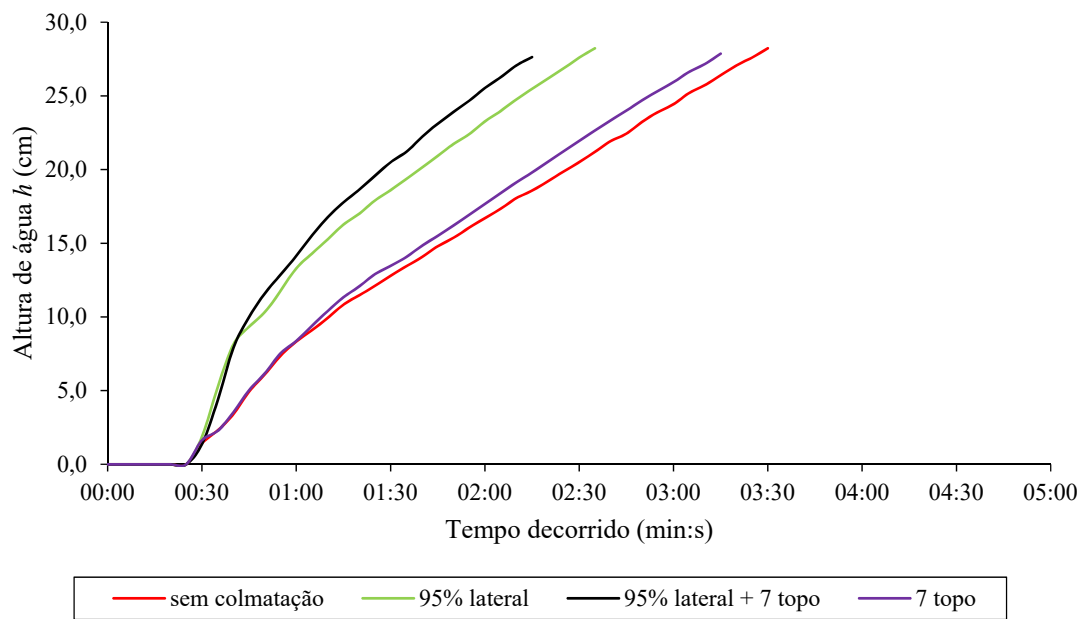


j) Colmatação de 90%

Figura A1.3: Alturas de água dos ensaios efetuados para o caudal $1,2 \times Q_0$ (continuação).

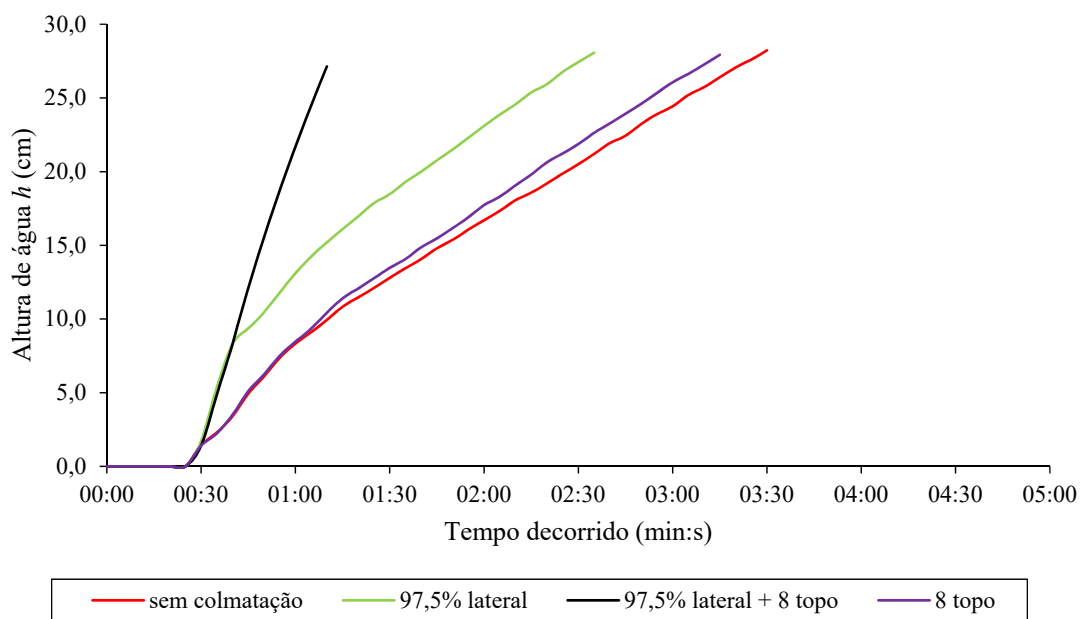


k) Colmatção de 92,5%

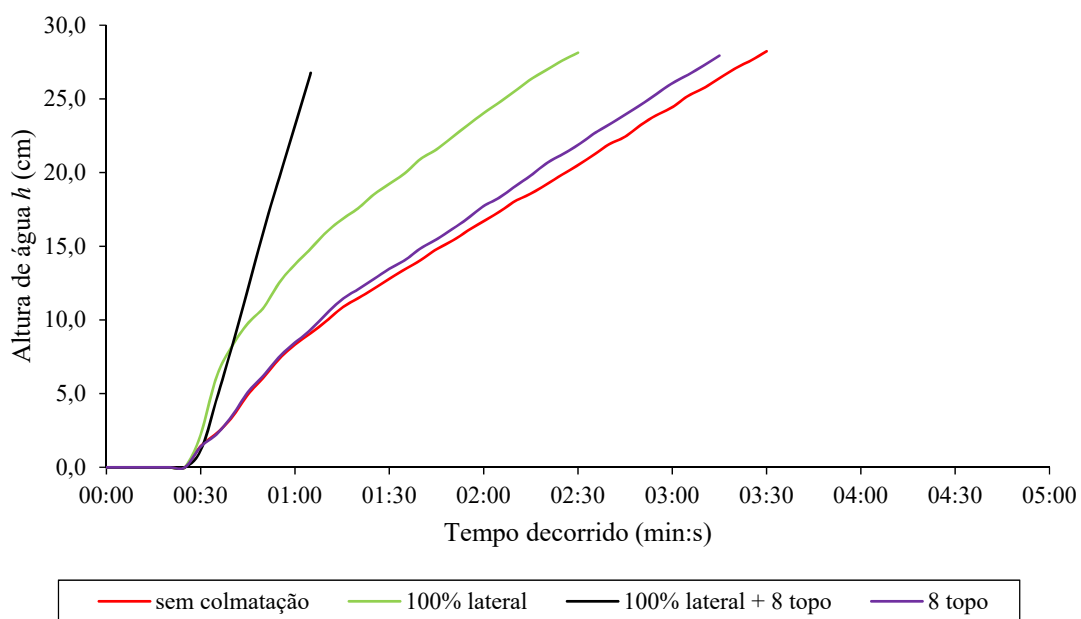


l) Colmatção de 95%

Figura A1.3: Alturas de água dos ensaios efetuados para o caudal $1,2 \times Q_0$ (continuação).

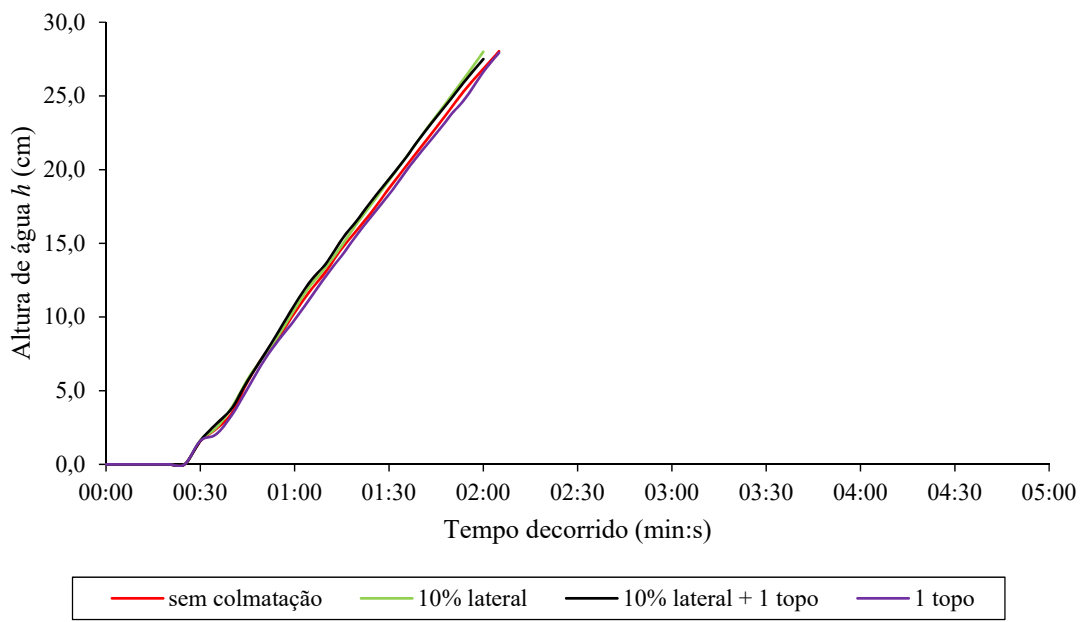


m) Colmatação de 97,5%

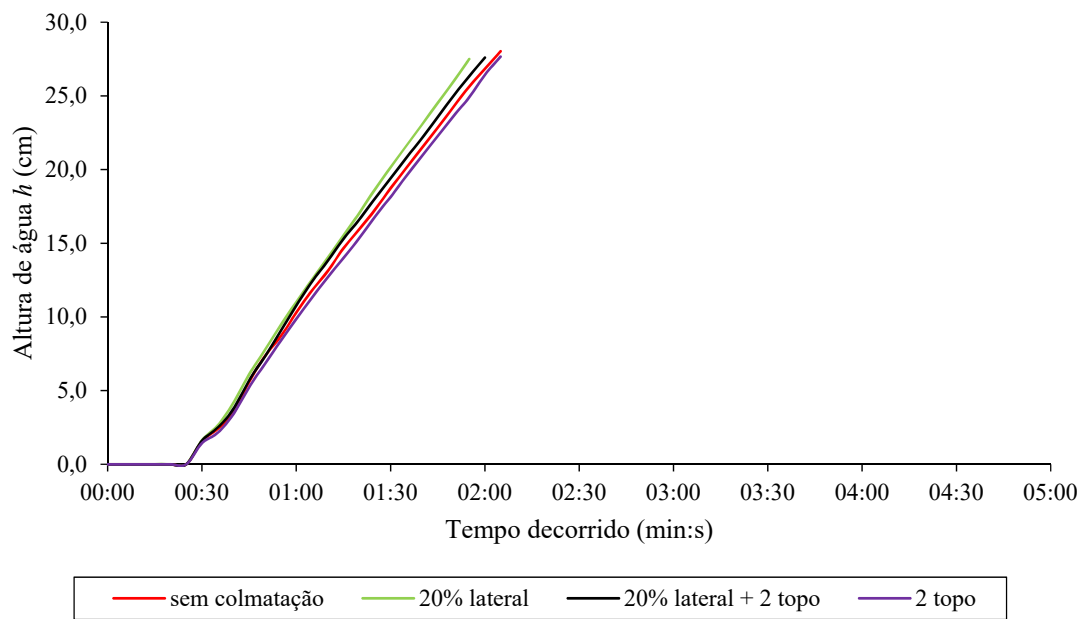


n) Colmatação de 100%

Figura A1.3: Alturas de água dos ensaios efetuados para o caudal $1,2 \times Q_0$ (continuação).

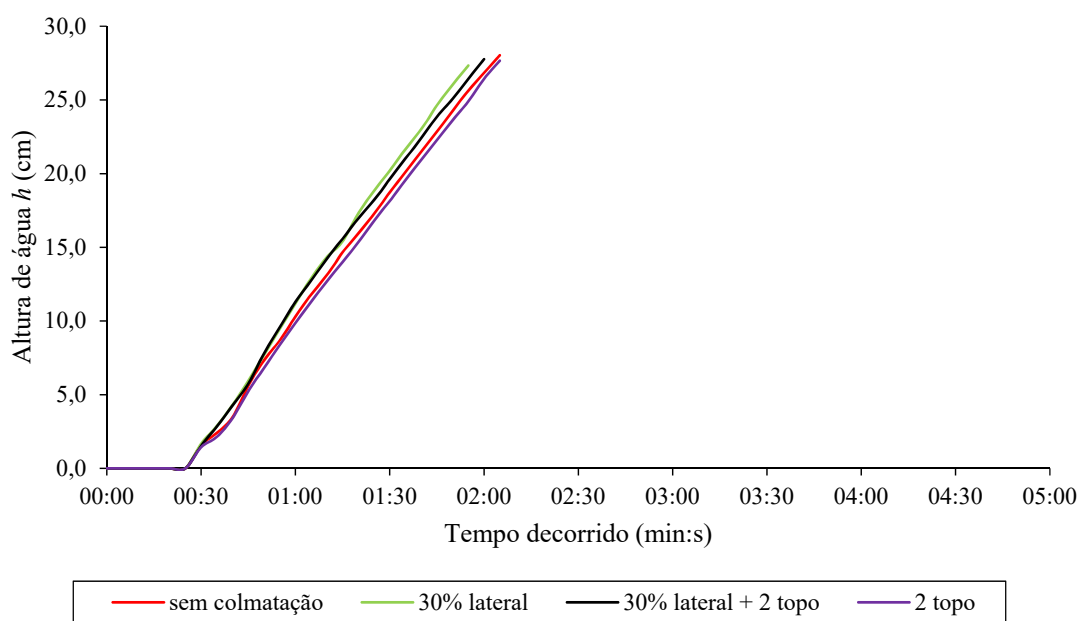


a) Colmatção de 10%

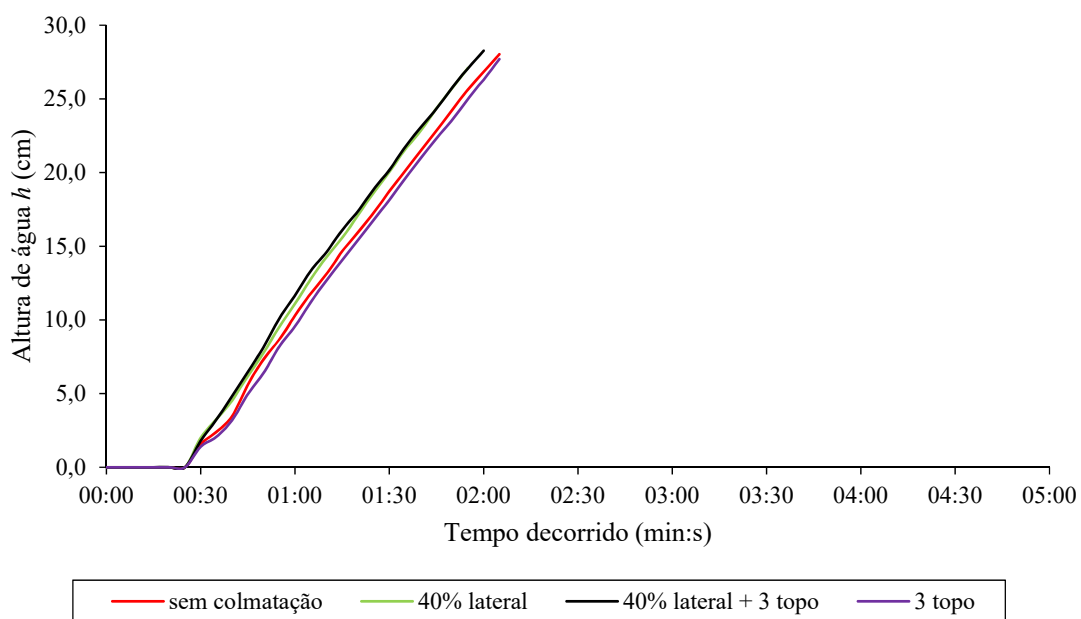


b) Colmatção de 20%

Figura A1.4: Alturas de água dos ensaios efetuados para o caudal $1,4 \times Q_0$.

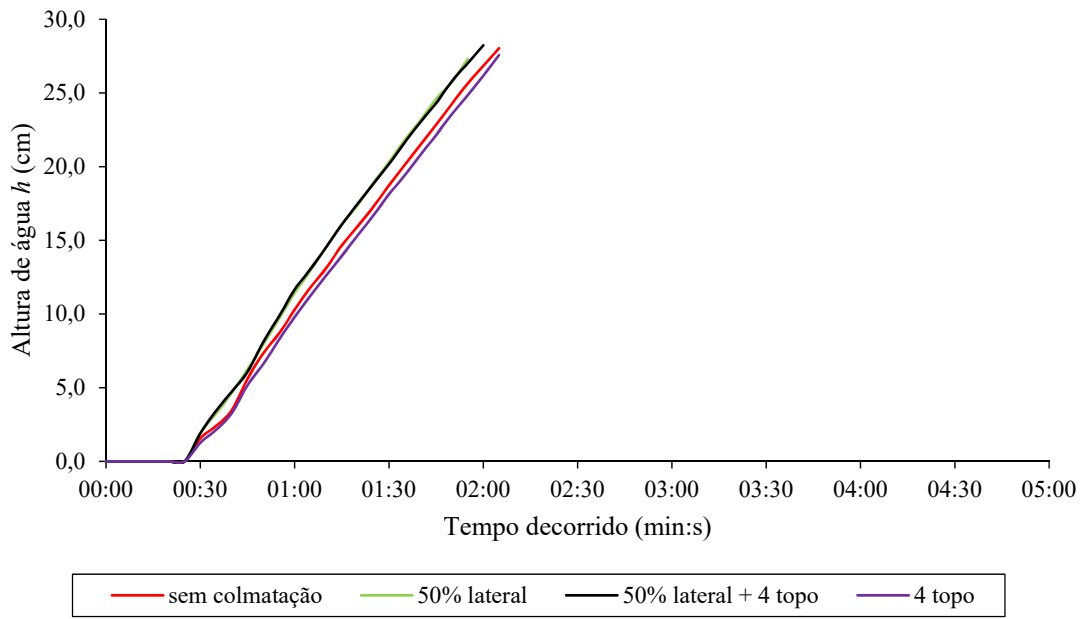


c) Colmatação de 30%

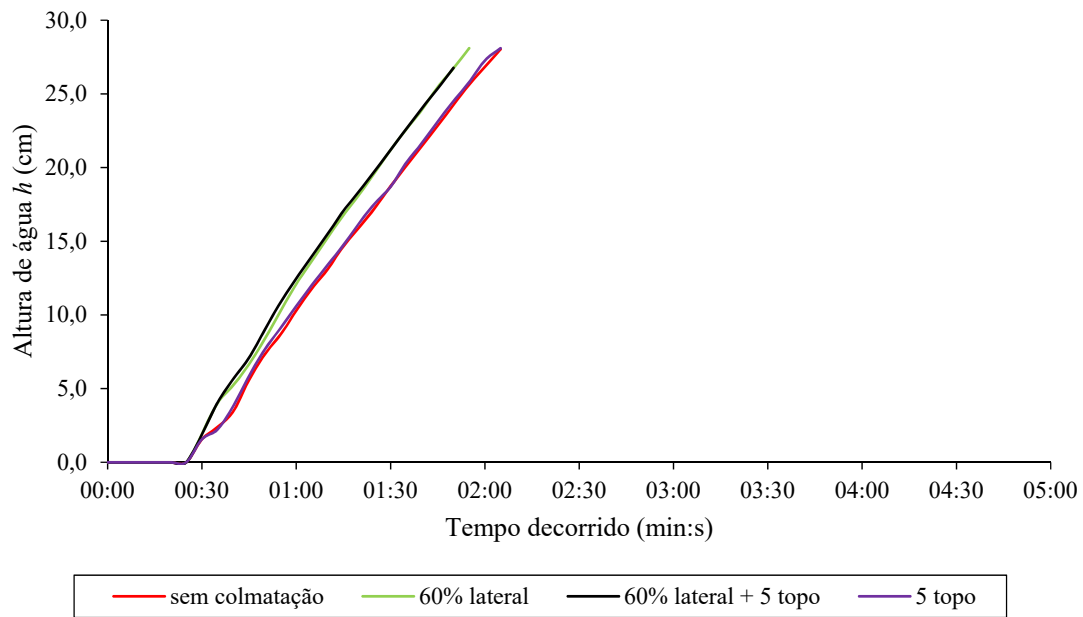


d) Colmatação de 40%

Figura A1.4: Alturas de água dos ensaios efetuados para o caudal $1,4 \times Q_0$ (continuação).

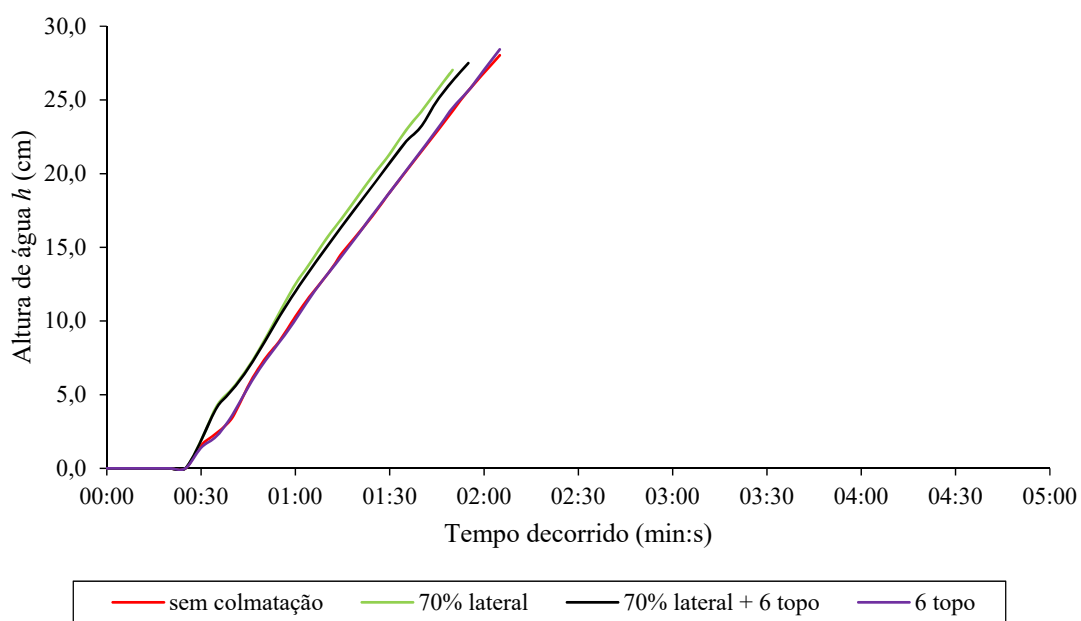


e) Colmatção de 50%

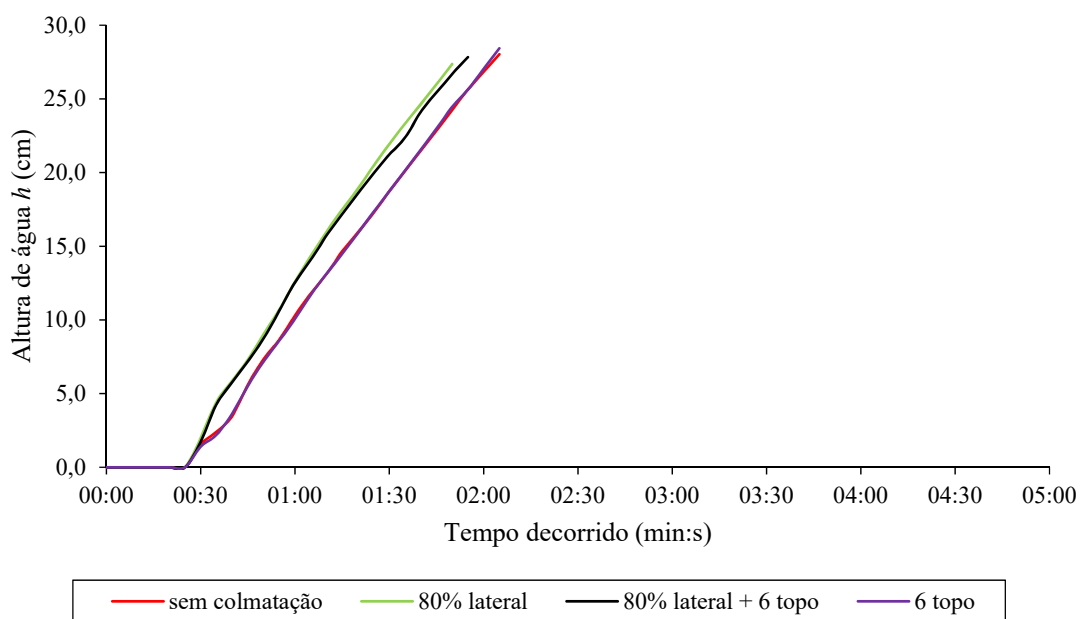


f) Colmatção de 60%

Figura A1.4: Alturas de água dos ensaios efetuados para o caudal $1,4 \times Q_0$ (continuação).

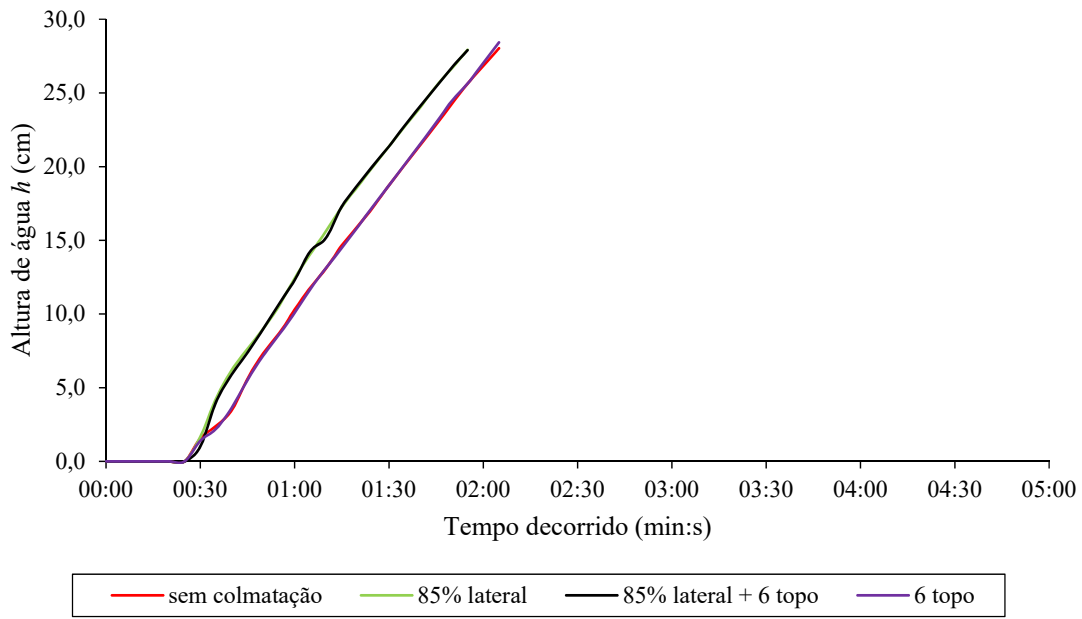


g) Colmatação de 70%

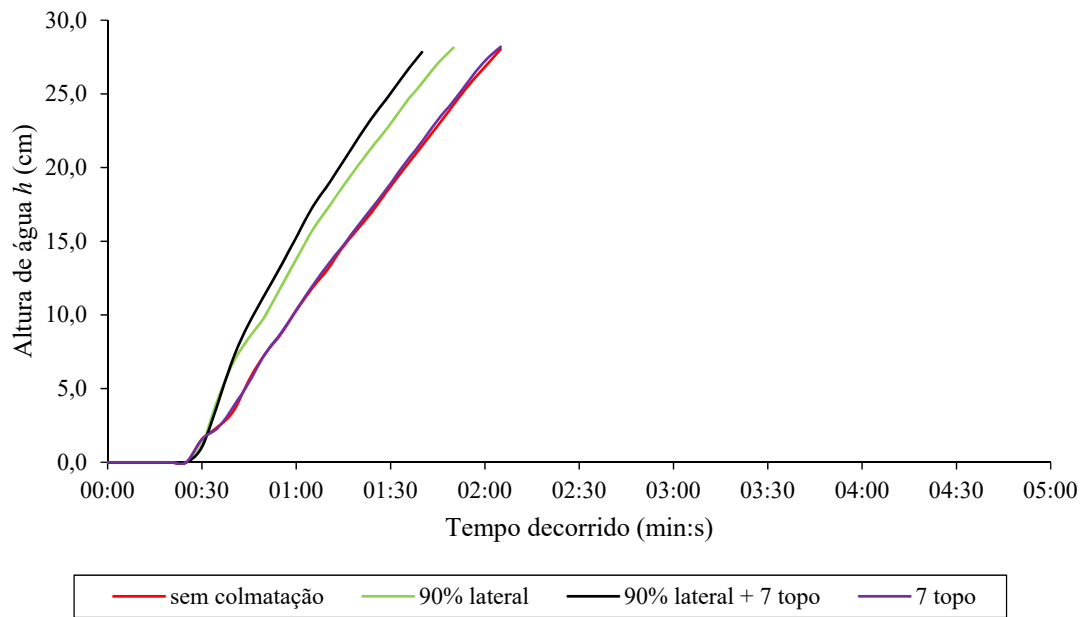


h) Colmatação de 80%

Figura A1.4: Alturas de água dos ensaios efetuados para o caudal $1,4 \times Q_0$ (continuação).

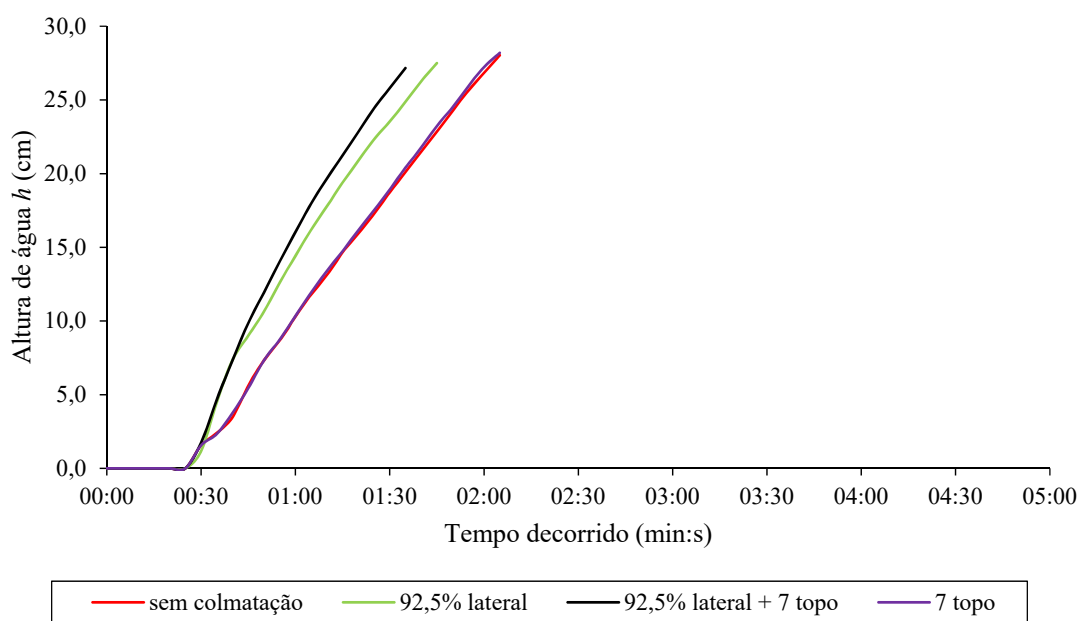


i) Colmatagem de 85%

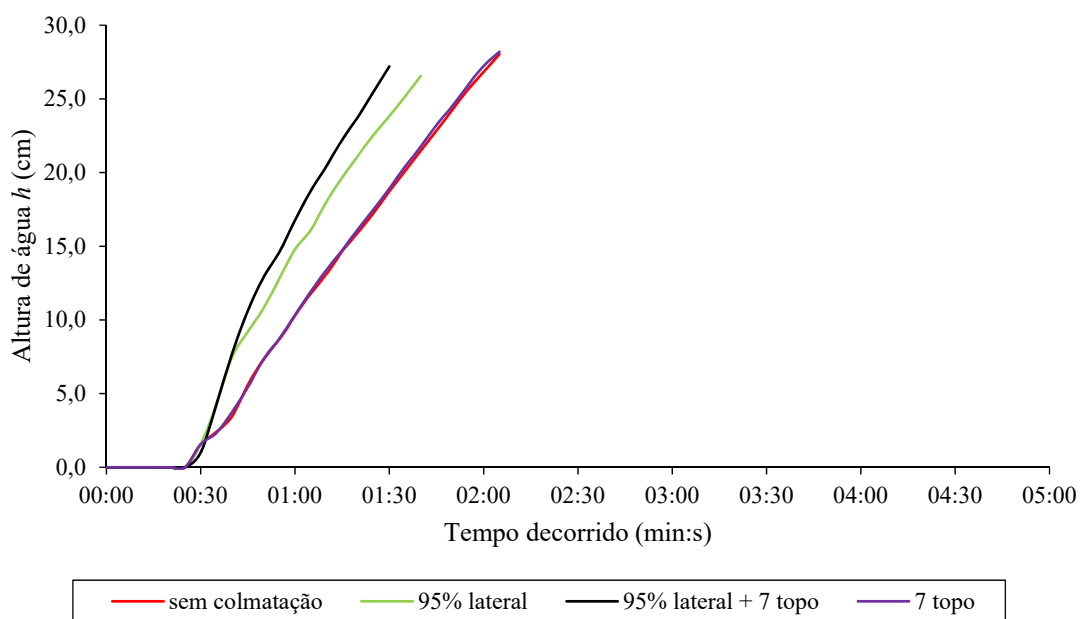


j) Colmatagem de 90%

Figura A1.4: Alturas de água dos ensaios efetuados para o caudal $1,4 \times Q_0$ (continuação).

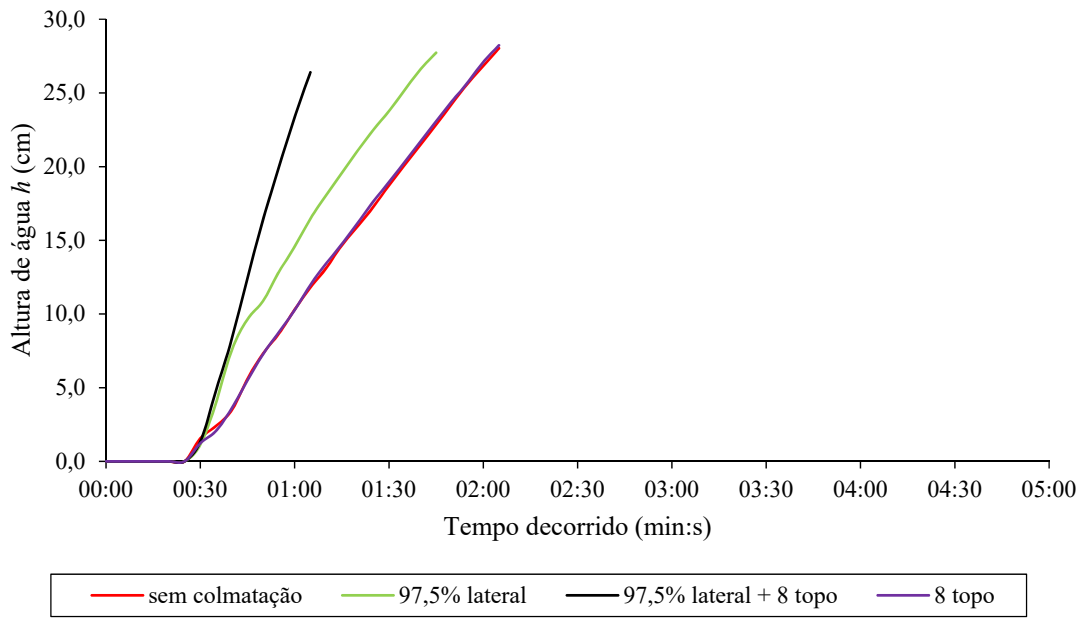


k) Colmatação de 92,5%

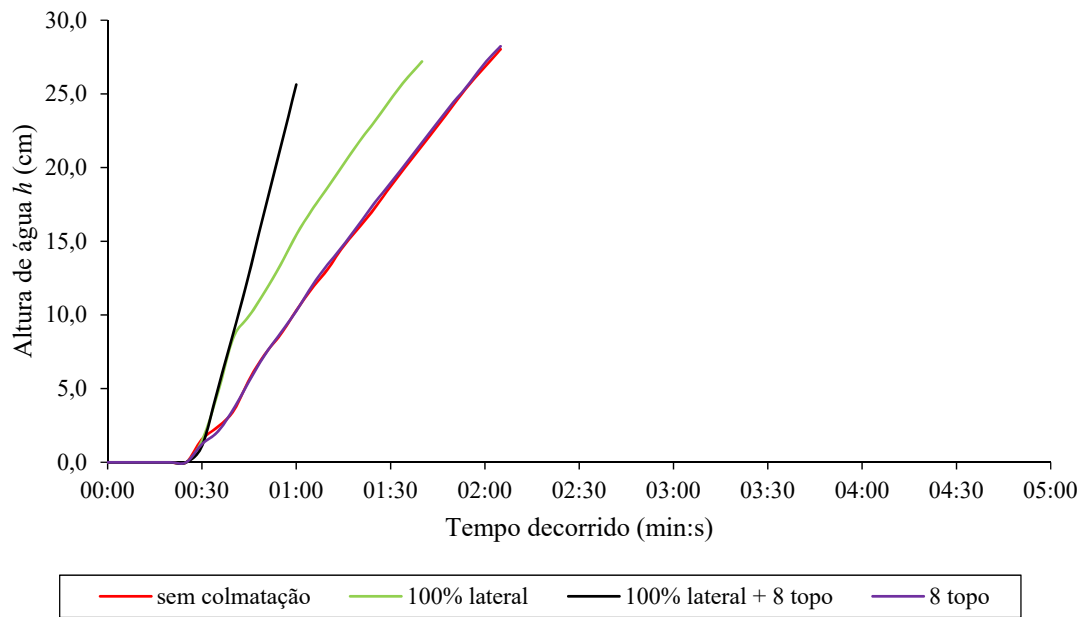


l) Colmatação de 95%

Figura A1.4: Alturas de água dos ensaios efetuados para o caudal $1,4 \times Q_0$ (continuação).



m) Colmatação de 97,5%



n) Colmatação de 100%

Figura A1.4: Alturas de água dos ensaios efetuados para o caudal $1,4 \times Q_0$ (continuação).