

Emulsionamento de ar e dissipação de energia do escoamento em descarregadores de cheias em degraus com soleira em teclado de piano

Rogério de Castilho de Paula Gomes

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Civil

Orientadores: Professor Doutor Jorge de Saldanha Gonçalves Matos

Doutora Maria Teresa Fontelas dos Santos Viseu

Júri

Presidente: Professor Doutor Rodrigo de Almada Cardoso Proença de Oliveira

Orientador: Professor Doutor Jorge de Saldanha Gonçalves Matos

Vogais: Professora Doutora Inês Osório de Castro Meireles

Professor Doutor João Pedro Gomes Moreira Pêgo

Janeiro de 2018

Agradecimentos

Ao meu orientador, o Professor Doutor Jorge de Saldanha Gonçalves Matos pela oportunidade dada de realizar uma dissertação com trabalho experimental, pelo apoio, paciência e disponibilidade total.

À Doutora Maria Teresa Fontelas dos Santos Viseu, chefe do Núcleo de Recursos Hídricos e Estruturas Hidráulicas (NRE) do Departamento de Hidráulica e Ambiente (DHA) do LNEC, pela oportunidade dada de realizar a minha dissertação no LNEC e a disponibilidade em contribuir.

Às pessoas que me ajudaram direta e indiretamente ao longo da fase experimental, à Adelaide Gonçalves, ao Engenheiro Ricardo Jónatas, à Maria José Henriques e ao Nuno Aido Pereira.

Ao meu colega Engenheiro Miguel Pinto, pela disponibilidade em responder às minhas questões e apoio na fase inicial da experimentação.

Ao meu padrinho de curso e especialmente amigo, Guilherme, pelo apoio e amizade demonstrada ao longo do curso.

Aos meus grandes amigos, André, David, Dora, Frederico, Gonçalo, João e Tomás, pela amizade e companhia constante.

À minha irmã mais velha, Inês, e à minha gémea, Mariana, por serem as melhores pessoas e irmãs que alguém poderia desejar.

Aos meus cunhados, Pedro e Nuno, por fazerem parte da minha família.

Ao meu tio avô, José Armando, pela companhia ao longo do meu percurso no técnico.

Aos meus pais, por acreditarem sempre em mim, são os melhores.

Resumo

O presente estudo é dedicado à investigação do escoamento deslizante sobre turbilhões e do ressalto hidráulico numa bacia de dissipação de energia, para um descarregador de cheias em degraus com soleira descarregadora em teclado de piano (PKW).

Os ensaios experimentais decorreram no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), onde se procedeu à medição da concentração de ar ao longo do descarregador e das alturas piezométricas na bacia de dissipação de energia.

No descarregador em degraus, analisaram-se os perfis de concentração de ar, bem como a evolução das concentrações médias de ar e das alturas representativas do escoamento de emulsão ar-água ao longo do descarregador. Obtiveram-se concentrações médias de ar ao longo do descarregador ligeiramente inferiores para o descarregador com degraus de 4 cm de altura em relação ao descarregador com degraus de 8 cm de altura.

Na bacia de dissipação de energia, avaliou-se a distribuição transversal de alturas piezométricas no trecho inicial e a evolução das alturas piezométricas ao longo da bacia. A partir das alturas piezométricas estimou-se a altura equivalente de água, a energia específica residual e a perda de carga total no descarregador. Obteve-se ligeiramente menor dissipação de energia no descarregador com degraus de 4 cm em relação à obtida com degraus de 8 cm de altura, e ligeiramente menor dissipação de energia para a soleira do tipo PKW comparativamente à soleira do tipo WES.

Por fim, apresentam-se expressões adimensionais para estimar a perda de carga em descarregadores em degraus com soleiras descarregadoras do tipo WES ou PKW.

Palavras chave: descarregador de cheias em degraus, soleira descarregadora em teclado de piano (PKW), escoamento deslizante sobre turbilhões, emulsão de ar, bacia de dissipação de energia, dissipação de energia.

Abstract

The present study is focussed on the skimming flow on a stepped spillway downstream of a piano key weir (PKW), as well as on the hydraulic jump on its adjacent stilling basin.

The experimental study took place at the National Laboratory of Civil Engineering (LNEC). Therein air concentration data were acquired along the stepped spillway, and piezometric head data measured on the stilling basin floor.

Along the stepped spillway, air concentration distribution, mean air concentration, equivalent clear water depth and characteristic flow depths were analysed. The results indicate that the mean air concentrations obtained along the stepped spillway downstream of a piano key weir with 4 cm high steps are slightly lower than those obtained with 8 cm high steps.

For the stilling basin, the distribution of the piezometric head at the initial section and the development of the piezometric head along the stilling basin were analysed. Based on the piezometric head, the equivalent clear water depth, the residual specific energy and the total energy dissipation at the spillway were analysed. The results indicate that the total energy dissipation for the stepped spillway downstream of a piano key weir with 4 cm high steps is slightly lower than those obtained with 8 cm high steps. Also, the total energy dissipation in the chute with a PKW weir is slightly lower than that in the chute with a WES weir.

Finally, normalized formulae are presented to estimate the head loss on stepped spillways downstream of PKW or WES weirs.

Keywords: stepped spillway, piano key weir (PKW), skimming flow, air entrainment, stilling basin, energy dissipation.

Índice

1. Introdução.....	1
1.1. Enquadramento.....	1
1.2. Objetivos.....	1
1.3. Estrutura do documento.....	2
2. Revisão bibliográfica.....	3
2.1. Considerações prévias.....	3
2.2. Soleiras descarregadoras em teclado de piano.....	3
2.2.1. Considerações gerais.....	3
2.2.2. Geometria e nomenclatura.....	6
2.3. Descarregadores de cheias em degraus.....	8
2.3.1. Considerações gerais.....	8
2.3.2. Tipos de escoamento.....	8
2.3.3. Escoamento deslizante sobre turbilhões.....	9
2.4. Bacias de dissipação de energia por ressalto hidráulico.....	11
2.4.1. Ressalto hidráulico.....	11
2.4.2. Tipos de bacias de dissipação de energia por ressalto hidráulico.....	12
2.5. Energia específica residual.....	14
3. Instalação experimental, equipamento de medição e programa de ensaios.....	17
3.1. Considerações prévias.....	17
3.2. Descrição geral da instalação experimental.....	17
3.3. Soleira descarregadora do tipo PKW.....	21
3.4. Sistema de medição e de aquisição digital da concentração de ar.....	23
3.4.1. Sonda de deteção de bolhas de ar e respetiva pseudo-calibração.....	23
3.4.2. Metodologia de experimentação.....	25
3.5. Programa de ensaios.....	26
3.5.1. Escoamento deslizante sobre turbilhões.....	26
3.5.2. Ressalto hidráulico.....	27
4. Caracterização do escoamento no descarregador e na bacia de dissipação de energia.....	31
4.1. Considerações prévias.....	31
4.2. Escoamento deslizante sobre turbilhões.....	32
4.2.1. Grandezas características do escoamento de emulsão ar-água.....	32
4.2.2. Distribuição da concentração de ar.....	33
4.2.3. Evolução da concentração média de ar.....	48

4.2.4.	Evolução das alturas representativas do escoamento.....	50
4.3.	Ressalto hidráulico na bacia de dissipação de energia.....	52
4.3.1.	Considerações prévias.....	52
4.3.2.	Alturas piezométricas no trecho inicial.....	53
4.3.2.1.	Alturas piezométricas máximas e mínimas.....	53
4.3.2.2.	Alturas piezométricas médias.....	58
4.3.3.	Evolução das alturas piezométricas ao longo da bacia de dissipação de energia.....	61
4.3.4.	Altura equivalente de água na secção de montante do ressalto e dissipação de energia.....	67
5.	Conclusões.....	73
5.1.	Síntese e conclusões.....	73
5.2.	Sugestões para prosseguimento do estudo.....	75
	Bibliografia.....	77
	Anexo 1 – Curva de vazão da soleira descarregadora em teclado de piano	
	Anexo 2 – Alturas piezométricas médias e alturas do escoamento ao longo da bacia de dissipação de energia	

Lista de figuras

Figura 2.1 – Soleira descarregadora em teclado de piano: a) instalação experimental (LNEC); b) representação esquemática.	3
Figura 2.2 – Barragem de Malarce, em França (retirado a 2 de dezembro de 2017, de http://www.climatesolutionsplatform.org/solution/piano-keys-to-handle-exceptional-floods/).	4
Figura 2.3 – Principais grandezas de uma soleira descarregadora em teclado de piano: a) vista 3D; b) perfil e planta (adaptado de Pralong <i>et al.</i> , 2011).	6
Figura 2.4 – Representação esquemática dos quatro tipos de soleiras descarregadoras em teclado de piano (adaptado de Erpicum <i>et al.</i> , 2017).	7
Figura 2.5 – Representação esquemática do perfil longitudinal e dos tipos de escoamento deslizante sobre turbilhões em descarregadores de cheias em degraus com soleira descarregadora do tipo WES (adaptado de Matos, 1999).	9
Figura 2.6 – Escoamento deslizante sobre turbilhões em descarregadores de cheias em degraus: a) soleira descarregadora do tipo WES, para $h_d=8$ cm e $Q=80$ l/s (Matos, 1999); b) soleira descarregadora do tipo WES, para $h_d=8$ cm e $Q=140$ l/s (Matos, 1999); c) soleira descarregadora do tipo PKW, para $h_d=4$ cm e $Q=80$ l/s; d) soleira descarregadora do tipo PKW, para $h_d=4$ cm e $Q=140$ l/s.	10
Figura 2.7 – Definição esquemática de uma bacia de dissipação de energia por ressalto hidráulico do tipo III do <i>United States Bureau of Reclamation</i> (Peterka, 1958).	12
Figura 2.8 – Bacia de dissipação de energia com acessórios (Pinto, 2017).	13
Figura 3.1 – Instalação experimental: planta, alçado principal e corte transversal (adaptado de Matos, 1999).	18
Figura 3.2 – Instalação experimental: a) reservatório de entrada; b) fiada de tijolos; c) conduta de abastecimento do reservatório de entrada.	19
Figura 3.3 – Instalação experimental: a) soleira descarregadora em teclado de piano; b) descarregador em degraus; c) paredes laterais de vidro acrílico.	20
Figura 3.4 – Instalação experimental: a) carro de instrumentação; b) bacia de dissipação de energia; c) comporta plana a jusante da bacia de dissipação de energia.	20
Figura 3.5 – Instalação experimental: a) canal de regularização; b) tranquilização do escoamento no canal de regularização; c) descarregador <i>Bazin</i> a jusante do canal de regularização.	21
Figura 3.6 – Soleira descarregadora do tipo PKW do presente estudo: a) planta; b) alçado.	22
Figura 3.7 – Equipamentos usados para medição da concentração de ar: a) aparelhagem utilizada para a aquisição digital da concentração de ar; b) sonda de ar em funcionamento.	23
Figura 3.8 – Representação esquemática da aparelhagem de medição da concentração de ar: a) sonda de ar; b) aparelho eletrónico de deteção de bolhas de ar (Matos, 1999).	24

Figura 3.9 – Posição da sonda de ar para: a) calibração prévia com soleira descarregadora do tipo PKW; b) nivelamento das curvas de polarização em computador.	26
Figura 3.10 – Localização das tomadas de pressão no trecho em betão.	27
Figura 3.11 – Localização das tomadas de pressão no trecho inicial em vidro acrílico: a) globalidade das tomadas de pressão; b) pormenor das tomadas de pressão localizadas junto do eixo de simetria do canal (distâncias ao pé do descarregador para degraus de 8 cm de altura).	28
Figura 3.12 – Quadros manométricos da instalação experimental.	29
Figura 4.1 – Distribuição da concentração de ar no eixo de simetria da tecla exterior, para $Q=80$ l/s: a) perfil completo; b) região inferior do perfil.	34
Figura 4.2 – Distribuição da concentração de ar no eixo de simetria da tecla interior, para $Q=80$ l/s: a) perfil completo; b) região inferior do perfil.	34
Figura 4.3 – Distribuição da concentração de ar no eixo de simetria da tecla exterior, para $Q=140$ l/s: a) perfil completo; b) região inferior do perfil.	35
Figura 4.4 – Distribuição da concentração de ar no eixo de simetria da tecla interior, para $Q=140$ l/s: a) perfil completo; b) região inferior do perfil.	35
Figura 4.5 – Distribuição da concentração de ar do presente estudo e de Reis (2015), para $Q=80$ l/s.	37
Figura 4.6 – Distribuição adimensional da concentração de ar do presente estudo e de Reis (2015), para $Q=80$ l/s.	38
Figura 4.7 – Distribuição da concentração de ar do presente estudo e de Reis (2015), para $Q=140$ l/s.	40
Figura 4.8 – Distribuição adimensional da concentração de ar do presente estudo e de Reis (2015), para $Q=140$ l/s.	41
Figura 4.9 – Distribuição da concentração de ar do presente estudo e de Meireles (2004), para $Q=80$ l/s.	43
Figura 4.10 – Distribuição adimensional da concentração de ar do presente estudo e de Meireles (2004), para $Q=80$ l/s.	44
Figura 4.11 – Distribuição da concentração de ar do presente estudo e de Meireles (2004), para $Q=140$ l/s.	46
Figura 4.12 – Distribuição adimensional da concentração de ar do presente estudo e de Meireles (2004), para $Q=140$ l/s.	47
Figura 4.13 – Concentrações médias de ar nos eixos de simetria das teclas exterior e interior do presente estudo e de Reis (2015), na mesma instalação experimental com altura de degraus de 8 cm e soleira descarregadora do tipo PKW.	48

Figura 4.14 – Concentrações médias de ar ao longo do descarregador do presente estudo e de Meireles (2004) e Matos (1999), na mesma instalação experimental com altura de degraus de 4 e 8 cm, respetivamente, e soleira descarregadora do tipo WES.....	49
Figura 4.15 – Altura equivalente de água ao longo do descarregador em degraus, nos eixos de simetria das teclas exterior e interior, para $Q=80$ l/s; comparação com os resultados obtidos por Reis (2015) e por Meireles (2004).....	50
Figura 4.16 – Altura característica do escoamento ao longo do descarregador em degraus, nos eixos de simetria das teclas exterior e interior, para $Q=80$ l/s; comparação com os resultados obtidos por Reis (2015) e por Meireles (2004).	51
Figura 4.17 – Altura equivalente de água ao longo do descarregador em degraus, nos eixos de simetria das teclas exterior e interior, para $Q=140$ l/s; comparação com os resultados obtidos por Reis (2015) e por Meireles (2004).....	51
Figura 4.18 – Altura característica do escoamento ao longo do descarregador em degraus, nos eixos de simetria das teclas exterior e interior, para $Q=140$ l/s; comparação com os resultados obtidos por Reis (2015) e por Meireles (2004).	51
Figura 4.19 – Linhas de corrente do escoamento no início do ressalto hidráulico.	52
Figura 4.20 – Localização do início do ressalto hidráulico, para as posições 1,2 e 3; Representação esquemática (adaptado de Pinto, 2017).	53
Figura 4.21 – Planta da soleira descarregadora do tipo PKW.	54
Figura 4.22 – Altura piezométricas máximas e mínimas na secção inicial da bacia de dissipação de energia, com início do ressalto hidráulico na posição 1 para $Q=80$ l/s; a) 1ª linha ($s=0,06$ m); b) 3ª linha ($s=0,12$ m); c) 6ª linha ($s=0,21$ m).	55
Figura 4.23 – Altura piezométricas máximas e mínimas na secção inicial da bacia de dissipação de energia, com início do ressalto hidráulico na posição 2 para $Q=80$ l/s; a) 1ª linha ($s=0,06$ m); (b) 3ª linha ($s=0,12$ m); (c) 6ª linha ($s=0,21$ m).	55
Figura 4.24 – Altura piezométricas máximas e mínimas na secção inicial da bacia de dissipação de energia, com início do ressalto hidráulico na posição 3 para $Q=80$ l/s; a) 1ª linha ($s=0,06$ m); (b) 3ª linha ($s=0,12$ m); (c) 6ª linha ($s=0,21$ m).	56
Figura 4.25 – Altura piezométricas máximas e mínimas na secção inicial da bacia de dissipação de energia, com início do ressalto hidráulico na posição 1 para $Q=180$ l/s; a) 1ª linha ($s=0,06$ m); (b) 3ª linha ($s=0,12$ m); (c) 6ª linha ($s=0,21$ m).....	56
Figura 4.26 – Altura piezométricas máximas e mínimas na secção inicial da bacia de dissipação de energia, com início do ressalto hidráulico na posição 2 para $Q=180$ l/s; a) 1ª linha ($s=0,06$ m); (b) 3ª linha ($s=0,12$ m); (c) 6ª linha ($s=0,21$ m).....	57

Figura 4.27 – Altura piezométricas máximas e mínimas na secção inicial da bacia de dissipação de energia, com início do ressalto hidráulico na posição 3 para $Q=180$ l/s; a) 1ª linha ($s=0,06$ m); (b) 3ª linha ($s=0,12$ m); (c) 6ª linha ($s=0,21$ m).....	57
Figura 4.28 – Alturas piezométricas médias na secção inicial da bacia de dissipação de energia, para a posição 3 do ressalto hidráulico. Resultados obtidos com degraus de 4 e 8 cm de altura, para $Q=80$ l/s.....	58
Figura 4.29 – Alturas piezométricas médias na secção inicial da bacia de dissipação de energia, para a posição 3 do ressalto hidráulico. Resultados obtidos com degraus de 4 e 8 cm de altura, para $Q=100$ l/s.....	59
Figura 4.30 – Alturas piezométricas médias na secção inicial da bacia de dissipação de energia, para a posição 3 do ressalto hidráulico. Resultados obtidos com degraus de 4 e 8 cm de altura, para $Q=120$ l/s.....	59
Figura 4.31 – Alturas piezométricas médias na secção inicial da bacia de dissipação de energia, para a posição 3 do ressalto hidráulico. Resultados obtidos com degraus de 4 e 8 cm de altura, para $Q=140$ l/s.....	59
Figura 4.32 – Alturas piezométricas médias na secção inicial da bacia de dissipação de energia, para a posição 3 do ressalto hidráulico. Resultados obtidos com degraus de 4 e 8 cm de altura, para $Q=160$ l/s.....	60
Figura 4.33 – Alturas piezométricas médias na secção inicial da bacia de dissipação de energia, para a posição 3 do ressalto hidráulico. Resultados obtidos com degraus de 4 e 8 cm de altura, para $Q=180$ l/s.....	60
Figura 4.34 – Tomadas de pressão no trecho inicial em vidro acrílico, localizadas junto do eixo central.	61
Figura 4.35 – Comparação das alturas piezométricas médias ao longo da bacia de dissipação, para as três posições do ressalto hidráulico com os valores obtidos por Pinto (2017), para um descarregador em degraus com $h_d=8$ cm; $Q=80$ l/s.	62
Figura 4.36 – Comparação das alturas piezométricas médias ao longo da bacia de dissipação, para as três posições do ressalto hidráulico com os valores obtidos por Pinto (2017), para um descarregador em degraus com $h_d=8$ cm; $Q=180$ l/s.....	62
Figura 4.37 – Alturas piezométricas médias na bacia de dissipação sem acessórios, com início do ressalto hidráulico na posição 3.	64
Figura 4.38 – Alturas piezométricas médias no trecho inicial da bacia de dissipação sem acessórios, com início do ressalto hidráulico na posição 3.	64
Figura 4.39 – Evolução da altura piezométrica média em função da distância ao pé do descarregador; ambas as grandezas estão adimensionalizadas pela altura crítica.	66

Figura 4.40 – Evolução da altura piezométrica média em função da distância ao pé do descarregador, no trecho inicial da bacia de dissipação; ambas as grandezas estão adimensionalizadas pela altura crítica.....	66
Figura 4.41 – Altura equivalente de água na secção de montante do ressalto hidráulico: a) hipótese A; b) hipótese B.....	67
Figura 4.42 – Energia específica residual na secção de montante do ressalto hidráulico obtida para o presente estudo com degraus de 4 e 8 cm de altura.	68
Figura 4.43 – Energia específica residual obtida para o presente estudo e obtida por Meireles (2004): a) hipótese A; b) hipótese B.	69
Figura 4.44 – Influência da consideração das hipóteses A e B nos valores da altura equivalente de água e da energia específica residual.	70
Figura 4.45 – Perda de carga adimensionalizada pela altura crítica; hipótese A.....	71
Figura 4.46 – Perda de carga adimensionalizada pela altura crítica; hipótese B.	72

Lista de tabelas

Tabela 2.1 – Síntese das principais características de soleiras descarregadores em teclado de piano existentes e em projeto (adaptado de Leite Ribeiro <i>et al.</i> , 2013 e Laugier <i>et al.</i> , 2017).	5
Tabela 2.2 – Nomenclatura da geometria de uma soleira descarregadora do tipo <i>Piano Key Weir</i> (adaptado de Pralong <i>et al.</i> , 2011).....	7
Tabela 2.3 – Classificação do ressalto hidráulico (Peterka, 1958, <i>in</i> Cardoso, 2007).....	11
Tabela 2.4 – Tipos de bacias de dissipação de energia por ressalto hidráulico com acessórios propostas pelo <i>United States Bureau of Reclamation</i> (Peterka, 1958, <i>in</i> Lençraste, 1996).....	12
Tabela 3.1 – Características da soleira descarregadora do tipo PKW do presente estudo.....	22
Tabela 3.2 – Programa de ensaios para a medição de concentração de ar ao longo do descarregador em degraus.....	26
Tabela 3.3 – Programa de ensaios para a caracterização do escoamento na bacia de dissipação de energia.	29
Tabela 4.1 – Diferenças relativas entre as alturas piezométricas médias na secção a jusante do ressalto hidráulico na bacia de dissipação de energia, em relação à posição 2 do ressalto hidráulico.....	63

Lista de abreviaturas e símbolos

Latinas minúsculas

d_n	declive da altura piezométrica média
g	aceleração da gravidade
h	altura equivalente de água
h_c	altura crítica do escoamento
h_d	altura dos degraus do descarregador em degraus
h_{jr}	altura do escoamento na secção imediatamente a jusante do ressalto hidráulico
h_{mr}	altura equivalente de água na secção imediatamente a montante do ressalto hidráulico
h_{mrA}	altura equivalente de água na secção de montante do ressalto hidráulico para a hipótese A
h_{mrB}	altura equivalente de água na secção de montante do ressalto hidráulico para a hipótese B
h_{mr}^{piez}	altura piezométrica medida na soleira da bacia de dissipação na secção imediatamente a montante do ressalto hidráulico
p	pressão
q	caudal unitário de água
s	distância longitudinal ao início da bacia de dissipação/pé do descarregador
y	Distância medida segundo a normal à soleira de fundo fictícia; distância medida segundo a normal à bacia de dissipação

Latinas maiúsculas

B	comprimento total da soleira do tipo PKW
B_b	comprimento da base da soleira do tipo PKW
B_i	comprimento da projeção de jusante (tecla interior)
B_o	comprimento da projeção de montante (tecla exterior)
C	concentração pontual de ar
\bar{C}	concentração média de ar numa secção transversal
$C_{calibrador}$	concentração de ar calibrada através da curva de pseudo-calibração
C_{sonda}	concentração de ar obtida diretamente com a sonda de ar
E_{crista}	energia específica do escoamento no reservatório de entrada, medida em relação à crista da soleira descarregadora
E_{jr}	energia específica na secção a jusante do ressalto hidráulico
E_{max}	energia específica máxima do escoamento

E_{mr}	energia específica na secção a montante do ressalto hidráulico
E_r	energia específica residual no pé do descarregador
E_{rA}	energia específica residual na secção de montante do ressalto hidráulico na hipótese A
E_{rB}	energia específica residual na secção de montante do ressalto hidráulico na hipótese B
F_{rmr}	número de Froude na secção a montante do ressalto hidráulico
H_d	carga hidráulica de dimensionamento
H_{desc}	altura do descarregador, distância na vertical, entre a crista da soleira descarregadora e a bacia de dissipação de energia
L	comprimento total da crista; comprimento do ressalto hidráulico; distância das tomadas à parede esquerda do canal
L_u	comprimento da crista de uma unidade PKW
N_u	número de unidades PKW
P_b	altura correspondente à interseção das soleiras de fundo inclinadas das teclas exterior e interior
P_d	altura da base da soleira descarregadora
P_i	altura da tecla interior
P_m	diferença entre as alturas P_i e P_b
P_o	altura da tecla exterior
P_{pi}	altura do parapeito da soleira descarregadora da tecla interior
P_{po}	altura do parapeito da soleira descarregadora da tecla exterior
P_{ps}	altura do parapeito da soleira descarregadora da parede lateral
Q_d	caudal de dimensionamento
Q_u	caudal por unidade PKW
S_i	declive da soleira de fundo da tecla interior
S_o	declive da soleira de fundo da tecla exterior
T_{pi}	largura do parapeito da soleira descarregadora da tecla interior
T_{po}	largura do parapeito da soleira descarregadora da tecla exterior
T_{ps}	largura do parapeito da soleira descarregadora da parede lateral
T_s	espessura da parede lateral
U	velocidade média da água
U_{mr}	velocidade média da água na secção imediatamente a montante do ressalto hidráulico
V	distribuição de velocidades; velocidade da água à distância y da soleira

W	largura total da soleira do tipo PKW
W_i	largura da tecla interior
W_o	largura da tecla exterior
W_u	largura da unidade PKW
Y_{90}	altura característica do escoamento de emulsão de ar-água (distância à soleira de fundo fictícia, segundo a normal, do ponto em que a concentração de ar é 90%)

Gregas minúsculas

α	coeficiente da energia cinética
α'	coeficiente de quantidade de movimento
β	coeficiente de Jaeger-Manzanares
γ	peso volúmico da água
ρ	massa volúmica da água

Gregas maiúsculas

ΔH	perda de carga total no descarregador
Δp	diferença entre a pressão real e a correspondente à distribuição hidrostática, à distância y da soleira

Siglas de entidades

CEHIDRO	Centro de Estudos de Hidrossistemas do Instituto Superior Técnico
INAG	Instituto da Água
IST	Instituto Superior Técnico
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
NRE	Núcleo de Recursos Hídricos e Estruturas Hidráulicas do Laboratório Nacional de Engenharia Civil
USBR	<i>United States of Bureau of Reclamation</i>
WES	<i>Waterways Experiment Station</i>

Abreviaturas

PKW	soleira descarregadora em teclado de piano (<i>Piano Key Weir</i>)
PVC	policloreto de polivinila
BCC	betão compactado por cilindros

1. Introdução

1.1. Enquadramento

As barragens desempenham um papel importante no desenvolvimento dos países, sendo responsáveis pelo controlo de cheias, produção hidroelétrica, reservas de água para consumo e fins agrícolas, e navegação, entre outras funções.

No dimensionamento de uma barragem é fundamental garantir a sua segurança ao longo da sua vida útil. Com o aumento do conhecimento hidrológico, decorrente de séries de dados mais extensas, e das alterações que se fazem notar ao nível climático, nomeadamente no que concerne aos fenómenos meteorológicos extremos, tem-se vindo a efetuar a revisão dos caudais de dimensionamento de muitas barragens existentes, por forma a garantir o correto funcionamento dos respetivos descarregadores de cheias. Assim, a solução adotada poderá envolver o aumento da capacidade de vazão dos descarregadores de cheias já existentes, nomeadamente através da reabilitação das soleiras descarregadoras para soluções hidráulicamente mais eficazes. Nestes casos, constitui uma solução corrente a utilização de soleiras em labirinto, ou, mais recentemente, de soleiras em teclado de piano.

A soleira descarregadora em teclado de piano, pioneiramente desenvolvida pela empresa Hydrocoop, tem sido apresentada como sendo hidráulicamente mais eficaz do que a soleira em labirinto e com vantagem em relação a esta última pela facilidade de instalação no topo de uma barragem de gravidade.

1.2. Objetivos

O presente estudo vem no seguimento de outros, realizados num descarregador em degraus existente no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC). O principal objetivo desta investigação consiste no aprofundamento do conhecimento sobre as características do escoamento em duas componentes principais da instalação experimental, nomeadamente o canal descarregador em degraus e a bacia de dissipação de energia.

Dos trabalhos realizados anteriormente na presente instalação experimental é de sublinhar a dissertação de doutoramento desenvolvida por Matos (1999), no âmbito do qual foi idealizada e construída a instalação, bem como as dissertações de Meireles (2004, 2011), Renna (2004) e Cardoso (2007), nestes estudos a soleira descarregadora era do tipo WES.

Foram posteriormente realizados outros estudos nesta instalação experimental, com relevância para a presente dissertação (Reis, 2015 e Pinto, 2017), tendo a soleira descarregadora do tipo WES sido substituída por uma soleira descarregadora em teclado de piano.

O objetivo do presente trabalho incidiu na caracterização do escoamento deslizante sobre turbilhões e do escoamento na bacia de dissipação de energia sem acessórios, para um descarregador de cheias em degraus com soleira descarregadora em teclado de piano.

No descarregador em degraus pretendeu-se analisar os perfis de concentração de ar, a evolução das concentrações médias de ar e das alturas representativas do escoamento de emulsão ar-água ao longo do descarregador com degraus de 4 cm de altura.

Na bacia de dissipação de energia, por meio da leitura das alturas piezométricas ao longo da bacia, pretendeu-se avaliar a distribuição transversal de alturas piezométricas no trecho inicial, e comparar a evolução das alturas piezométricas ao longo do descarregador com resultados obtidos por outros autores, nomeadamente de Pinto (2017). Por fim, a partir das alturas piezométricas, na bacia pretendeu-se estimar a altura equivalente de água na secção de montante do ressalto hidráulico, a energia específica residual, a perda de carga total no descarregador, e comparar os resultados obtidos neste estudo com os de outros autores, para diferentes geometrias do descarregador de cheias.

1.3. Estrutura do documento

A dissertação encontra-se estruturada em cinco capítulos e dois anexos. No presente capítulo faz-se um breve enquadramento do tema da dissertação, inclui-se uma breve descrição dos estudos anteriormente realizados na mesma instalação experimental e apresentam-se os principais objetivos deste estudo.

No Capítulo 2 – *Revisão bibliográfica* – efetua-se uma descrição sumária sobre soleiras descarregadoras em teclado de piano, descarregadores em degraus, bacias de dissipação de energia e a metodologia aplicada em Meireles (2004) para a determinação da energia específica residual no pé do descarregador.

No Capítulo 3 – *Instalação experimental, equipamento de medição e programa de ensaios* – apresenta-se o programa de ensaios, uma descrição dos elementos que compõem a instalação experimental e dos equipamentos de medição utilizados, nomeadamente a sonda de deteção de bolhas de ar.

No Capítulo 4 – *Caracterização do escoamento no descarregador e na bacia de dissipação de energia* – apresentam-se os resultados obtidos de acordo com o programa de ensaios (Capítulo 3), analisa-se o escoamento deslizante sobre turbilhões e o escoamento na bacia de dissipação de energia.

No Capítulo 5 – *Conclusões* – apresentam-se as principais conclusões do trabalho desenvolvido e as sugestões para o prosseguimento da investigação.

2. Revisão bibliográfica

2.1. Considerações prévias

A instalação experimental utilizada no presente estudo inclui uma soleira descarregadora em teclado de piano, um descarregador em degraus e uma bacia de dissipação de energia. Uma vez que a soleira descarregadora já foi objeto de estudos anteriores, apresenta-se apenas no Anexo I uma breve análise comparativa, sendo abordados ao longo deste capítulo apenas os dois últimos tipos de estruturas.

No subcapítulo 2.2 apresenta-se uma síntese de conhecimentos acerca das soleiras descarregadoras em teclado de piano e exemplos de descarregadores de cheias que atualmente têm soleiras deste tipo.

No subcapítulo 2.3 abordam-se os descarregadores em degraus, sendo descritos os tipos de escoamento em descarregadores deste género, com especial relevo para o escoamento deslizante sobre turbilhões.

No subcapítulo 2.4 apresenta-se uma breve nota no âmbito das bacias de dissipação de energia por ressalto hidráulico e algumas conclusões obtidas em estudos realizados na mesma instalação experimental.

No subcapítulo 2.5 apresentam-se as metodologias aplicadas em Meireles (2004) para o cálculo da altura equivalente de água a montante do ressalto hidráulico na bacia de dissipação e da energia específica residual, considerando duas hipóteses de distribuição de pressões no pé do descarregador.

2.2. Soleiras descarregadoras em teclado de piano

2.2.1. Considerações gerais

A soleira descarregadora em teclado de piano, traduzido do inglês *Piano Key Weir* (PKW), é um caso particular de uma soleira em labirinto, com forma retangular em planta e que apresenta teclas com inclinações alternadas em relação à base, constituindo as teclas interiores e exteriores, respetivamente (Figura 2.1). O prolongamento da crista a montante ou a jusante da base é normalmente designado por projeção.

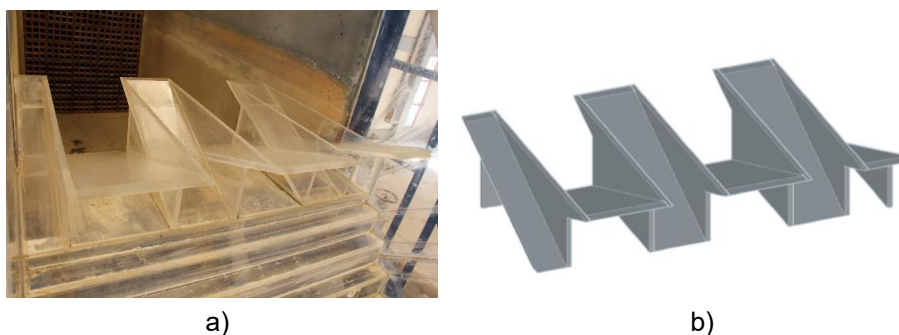


Figura 2.1 – Soleira descarregadora em teclado de piano: a) instalação experimental (LNEC); b) representação esquemática.

Este tipo de soleira permite o aumento do desenvolvimento da crista sem a necessidade de aumentar a largura do canal e a base estrutural da soleira descarregadora existente. A inclinação das teclas é responsável pela diminuição da altura das paredes da soleira descarregadora e consequentemente da quantidade de betão armado, tornando-a assim uma solução mais económica em relação à soleira em labirinto. Outra vantagem é o facto de poder ser instalada num espaço limitado, como por exemplo no topo de um descarregador construído numa barragem de gravidade.

Assim, este tipo de soleira descarregadora apresenta-se como uma solução viável para o aumento da capacidade de vazão na reabilitação de barragens, permitindo melhorar a segurança.

F. Lempérière e A. Ouamane, apresentaram, em 2003, os primeiros estudos relativos ao comportamento hidráulico de soleiras descarregadoras em teclado de piano para diferentes geometrias e a estimativa de custos associados a uma solução deste tipo. Segundo os autores, o projeto original foi planeado durante cinco anos pela empresa *Hydrocoop*. Os primeiros ensaios foram desenvolvidos em 1999 no Laboratório Nacional de Hidráulica da empresa *Electricité de France* (França) e em 2002 na Universidade de Roorke (Índia) e Universidade de Biskra (Argélia). Como resultado destes ensaios preliminares surgiram as primeiras geometrias que definiram a soleira descarregadora do tipo PKW. Uma das vantagens inicialmente constatada foi a capacidade de aumentar o caudal escoado para a mesma altura de água em pelo menos quatro vezes, quando comparada com uma soleira descarregadora do tipo WES com a mesma largura, e cerca de 10%, em relação a uma soleira descarregadora em labirinto (Lempérière e Ouamane, 2003).

Em 2006 foi construída a primeira soleira descarregadora do tipo PKW pela *Electricité de France* em Goulours (França). Atualmente, segundo Erpicum *et al.* (2017), existem mais de 25 soleiras descarregadoras do tipo PKW em funcionamento ou em construção no mundo (estando 19 dessas soleiras descritas na Tabela 2.1). Na Figura 2.2 apresenta-se a soleira descarregadora do tipo PKW da barragem de Malarce, em França.



Figura 2.2 – Barragem de Malarce, em França (retirado a 2 de dezembro de 2017, de <http://www.climatesolutionsplatform.org/solution/piano-keys-to-handle-exceptional-floods/>).

Tabela 2.1 – Síntese das principais características de soleiras descarregadores em teclado de piano existentes e em projeto (adaptado de Leite Ribeiro *et al.*, 2013 e Laugier *et al.*, 2017).

País	Projeto	Tipo de PKW	Q_d (m ³ /s)	q ($\frac{Q_d}{W}$) (m ² /s)	$\frac{H_d}{P_i}$	$\frac{L}{W}$	$\frac{P_i}{W_i}$	$\frac{W_i}{W_o}$	S_i	$\frac{P_i}{T_s}$	$\frac{P_{pi}}{P_i}$	Referência
Argélia	Ouldjet Mellegue	-	5240	0,70	0,70	4,80	-	1,00	-	-	0,00	Pfister <i>et al.</i> (2012)
Burkina Faso	Bambakari	-	1000	5,00	0,30	6,00	2,67	0,77	-	-	0,00	Lempérière <i>et al.</i> (2011)
França	Goulours	A	68	5,67	0,31	4,92	1,15	1,80	0,52	15,50	0,00	Laugier <i>et al.</i> (2017)
França	St Marc	A	138	7,67	0,32	4,28	1,35	1,41	0,48	16,80	0,00	Laugier <i>et al.</i> (2017)
França	Etroit	A	82	4,39	0,18	4,17	2,16	1,63	0,59	15,14	0,09	Laugier <i>et al.</i> (2017)
França	Gloriettes	A	90	4,86	0,27	4,69	1,30	1,53	0,46	12,00	0,00	Laugier <i>et al.</i> (2017)
França	Escoul.	-	13	2,71	0,36	4,58	1,38	1,44	0,46	6,00	0,00	Laugier <i>et al.</i> (2017)
França	Malarce	A	570	13,41	0,34	8,24	3,52	0,79	0,64	22,00	0,38	Laugier <i>et al.</i> (2017)
França	Campauleil	-	120	7,25	0,17	6,95	3,45	1,11	0,65	15,29	0,13	Laugier <i>et al.</i> (2017)
França	Charmines	-	300	6,52	0,23	5,22	1,83	1,50	0,47	12,51	0,23	Laugier <i>et al.</i> (2017)
França	Raviège	B	300	11,63	0,30	6,86	1,95	1,45	0,51	18,86	0,21	Laugier <i>et al.</i> (2017)
França	Gage	-	455	17,11	0,29	7,82	3,75	1,23	0,67	24,00	0,13	Laugier <i>et al.</i> (2017)
França	Record	-	1300	26,00	1,47	5,16	1,97	1,00	0,61	10,00	0,00	Laugier <i>et al.</i> (2017)
Índia	Lhasi	-	115	1,0	0,1	6,0	2,17	1,25	-	-	0,0	Lempérière <i>et al.</i> (2011)
Índia	Sawaa Kuddu	-	5240	38	0,6	4,9	1,33	-	-	-	-	Da Singhal e Sharma (2011)
Vietname	Van Pongh	-	8700	28,9	-	5,8	2,09	1,19	-	22	-	Ho Ta Khanh <i>et al.</i> (2011)
Vietname	Dakmi 2	-	500	6,7	-	5,0	-	-	-	-	0,0	Ho Ta Khanh <i>et al.</i> (2011)
Vietname	Ngan Truoi	-	1560	16,3	-	5,0	2,04	1,35	-	16	-	Ho Ta Khanh <i>et al.</i> (2011)
Vietname	Vinh Son 3	-	4000	40,0	-	5,0	-	-	-	-	-	Ho Ta Khanh <i>et al.</i> (2011)

Nota: As grandezas incluídas na tabela são (ver Figura 2.3 e Tabela 2.2): H_d , carga hidráulica de dimensionamento; L , comprimento total da crista; P_i , altura da tecla interior; P_{pi} , altura do parapeito da soleira descarregadora da tecla interior; q , caudal unitário; Q_d , caudal de dimensionamento; S_i , declive da soleira de fundo da tecla interior; T_s , espessura da parede lateral; W , largura total da soleira do tipo PKW; W_i , largura da tecla interior; W_o , largura da tecla exterior.

2.2.2. Geometria e nomenclatura

A definição de uma soleira descarregadora do tipo PKW envolve um elevado número de parâmetros pelo que se entendeu desejável normalizar a nomenclatura utilizada. Foi proposta uma nomenclatura pelas seguintes entidades: o Laboratório de Construções Hidráulicas da *École Polytechnique Fédérale de Lausanne* (Suíça); o Laboratório de Hidrologia, Hidrodinâmica Aplicada e Construções Hidráulicas da *Université de Liège* (Bélgica) e o Centro de Engenharia Hydro da *Electricité de France* (França) (Pralong *et al.*, 2011).

O elemento básico de uma soleira descarregadora do tipo PKW é definido como a unidade PKW e representa a menor extensão de uma estrutura completa. É composta por duas paredes laterais (*side wall: s*), uma tecla interior (*inlet key: i*) e duas metades de uma tecla exterior (*outlet key: o*). Na Figura 2.3 e na Tabela 2.2 apresenta-se a nomenclatura proposta por Pralong *et al.* (2011).

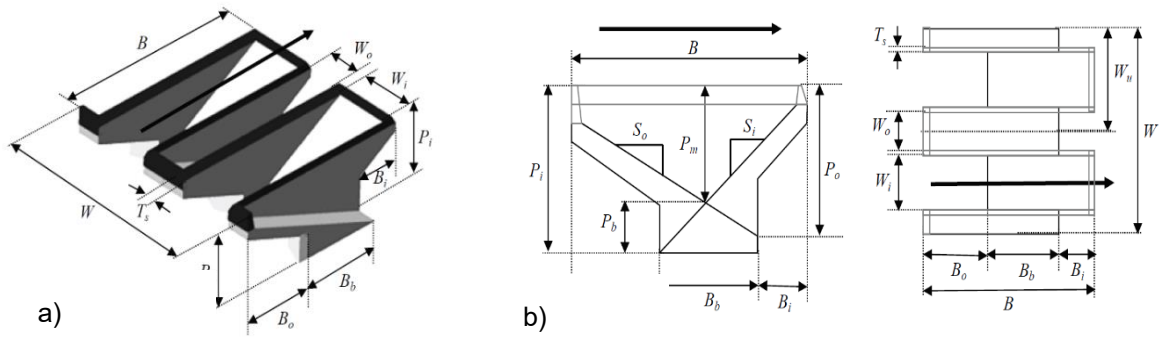


Figura 2.3 – Principais grandezas de uma soleira descarregadora em teclado de piano: a) vista 3D; b) perfil e planta (adaptado de Pralong *et al.*, 2011).

Tabela 2.2 – Nomenclatura da geometria de uma soleira descarregadora do tipo *Piano Key Weir* (adaptado de Pralong *et al.*, 2011).

Parâmetro	Definição
B	Comprimento total da soleira do tipo PKW ($B = B_b + B_i + B_o$)
B_i	Comprimento da projeção de jusante (tecla interior)
B_o	Comprimento da projeção de montante (tecla exterior)
B_b	Comprimento da base
P_i	Altura da tecla interior
P_o	Altura da tecla exterior
P_b	Altura correspondente à interseção das soleiras de fundo inclinadas das teclas exterior e interior
P_m	Diferença entre as alturas P_i e P_b
P_d	Altura da base da soleira descarregadora
P_{px}	Altura do parapeito da soleira descarregadora (x igual a o , i ou s)
T_{px}	Largura do parapeito da soleira descarregadora (x igual a o , i ou s)
S_i	Declive da soleira de fundo da tecla interior
S_o	Declive da soleira de fundo da tecla exterior
W	Largura total da soleira do tipo PKW
W_u	Largura da unidade PKW
W_i	Largura da tecla interior
W_o	Largura da tecla exterior
T_s	Espessura da parede lateral
L	Desenvolvimento total da crista
L_u	Desenvolvimento da crista de uma unidade PKW
N_u	Número de unidades PKW
Q_u	Caudal por unidade PKW

Existem quatro tipos de soleiras descarregadoras do tipo PKW (Figura 2.4): soleiras do tipo A (utilizada neste trabalho), que apresentam projeções a montante e a jusante; soleiras do tipo B, que apenas apresentam projeções a montante; soleiras do tipo C, que apenas possuem projeções a jusante; e soleiras do tipo D que, apesar de apresentarem o fundo inclinado, não possuem projeções.

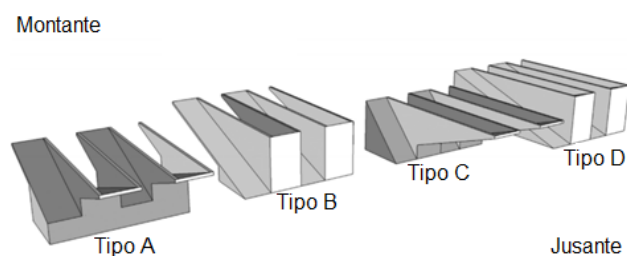


Figura 2.4 – Representação esquemática dos quatro tipos de soleiras descarregadoras em teclado de piano (adaptado de Erpicum *et al.*, 2017).

2.3. Descarregadores de cheias em degraus

2.3.1. Considerações gerais

Os descarregadores de cheias em degraus têm sido uma solução utilizada ao longo das últimas décadas. A sua utilização está associada ao aparecimento da técnica construtiva de betão compactado por cilindros (BCC) que surgiu na década de 70 e que se apresenta como uma solução económica e de fácil construção. O aumento de dissipação de energia ao longo do descarregador permite diminuir as dimensões da estrutura de dissipação de energia a jusante (em relação a um descarregador de paramento convencional).

2.3.2. Tipos de escoamento

O escoamento ao longo de um descarregador de cheias em degraus pode ser classificado em três tipos (e.g., Ohtsu e Yasuda, 1997, Matos, 1999, Fael, 2000, Chanson, 2001, Meireles, 2004):

- escoamento em quedas sucessivas – caracterizado por uma sucessão de quedas, de degrau em degrau, sendo a energia do escoamento dissipada por meio de fragmentação do jato no ar, no impacto do jato no degrau e, eventualmente, no ressalto hidráulico que se possa formar para determinadas configurações de degraus;
- escoamento deslizante sobre turbilhões – caracterizado pelo escoamento principal que desliza sobre a envolvente das extremidades dos degraus (que se define como a soleira de fundo fictícia) e pelo escoamento secundário que ocupa as cavidades formadas pelos degraus, sendo a energia do escoamento dissipada nos vórtices que se desenvolvem nas cavidades dos degraus;
- escoamento de transição – caracterizado por estarem representados os dois tipos de escoamento (escoamento em quedas sucessivas e escoamento deslizante sobre turbilhões) no mesmo descarregador e para igual caudal.

O tipo de escoamento num descarregador em degraus depende da geometria dos degraus e do caudal escoado. No mesmo descarregador em degraus pode ocorrer qualquer dos tipos de escoamento (em momentos distintos) em função do caudal escoado no descarregador.

Na instalação experimental do presente estudo obteve-se um escoamento deslizante sobre turbilhões para os caudais utilizados, tal como se verificou em estudos anteriores levados a cabo na mesma instalação (Matos, 1999, Meireles, 2004, Renna, 2004, Cardoso, 2007, Reis, 2015 e Pinto, 2017).

2.3.3. Escoamento deslizante sobre turbilhões

Segundo Matos (1999), o escoamento deslizante sobre turbilhões (com soleira descarregadora do tipo WES) pode ser dividido em quatro trechos distintos (Figura 2.5):

- escoamento sem emulsão de ar;
- escoamento com emulsão de ar parcialmente desenvolvido;
- escoamento com emulsão de ar completamente desenvolvido;
- escoamento em regime uniforme.

No primeiro trecho, escoamento sem emulsão de ar, a superfície livre encontra-se lisa e sem perturbações. Com a evolução da camada limite inicia-se a ondulação da superfície livre a montante da secção inicial de entrada do ar, denominada por secção de afloramento da camada limite. A jusante desta secção inicia-se a entrada do ar no seio do escoamento com emulsão de ar parcialmente desenvolvido. Quando as bolhas de ar penetram até à soleira de fundo, o escoamento passa a designar-se por escoamento com emulsão de ar completamente desenvolvido.

O regime uniforme é atingido quando as grandezas características do escoamento (*e.g.*, altura equivalente de água, altura característica do escoamento, concentração média de ar, distribuição de velocidades e distribuição da concentração de ar) são praticamente constantes ao longo do restante trecho do descarregador em degraus.

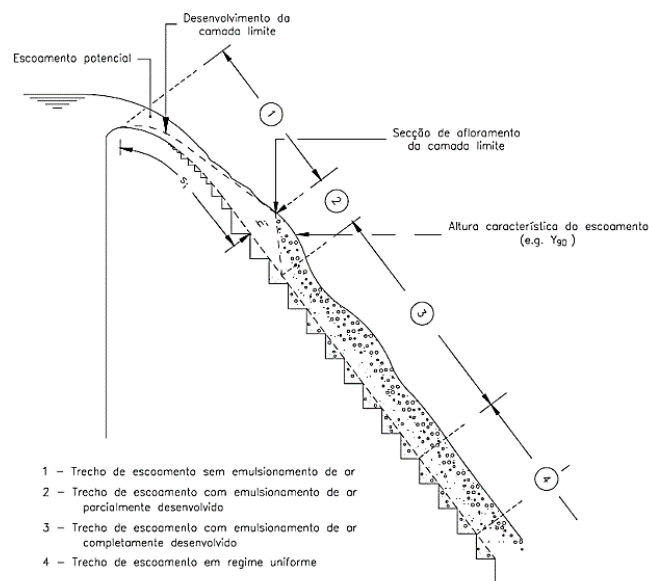


Figura 2.5 – Representação esquemática do perfil longitudinal e dos tipos de escoamento deslizante sobre turbilhões em descarregadores de cheias em degraus com soleira descarregadora do tipo WES (adaptado de Matos, 1999).

No presente estudo (descarregador em degraus com soleira descarregadora do tipo PKW), o escoamento deslizante sobre turbilhões é idêntico ao escoamento descrito por Matos (1999) para uma soleira descarregadora do tipo WES com diferenças no trecho inicial onde a tridimensionalidade e emulsão de ar no escoamento difere do escoamento proveniente de uma soleira descarregadora do tipo WES (Figura 2.6).

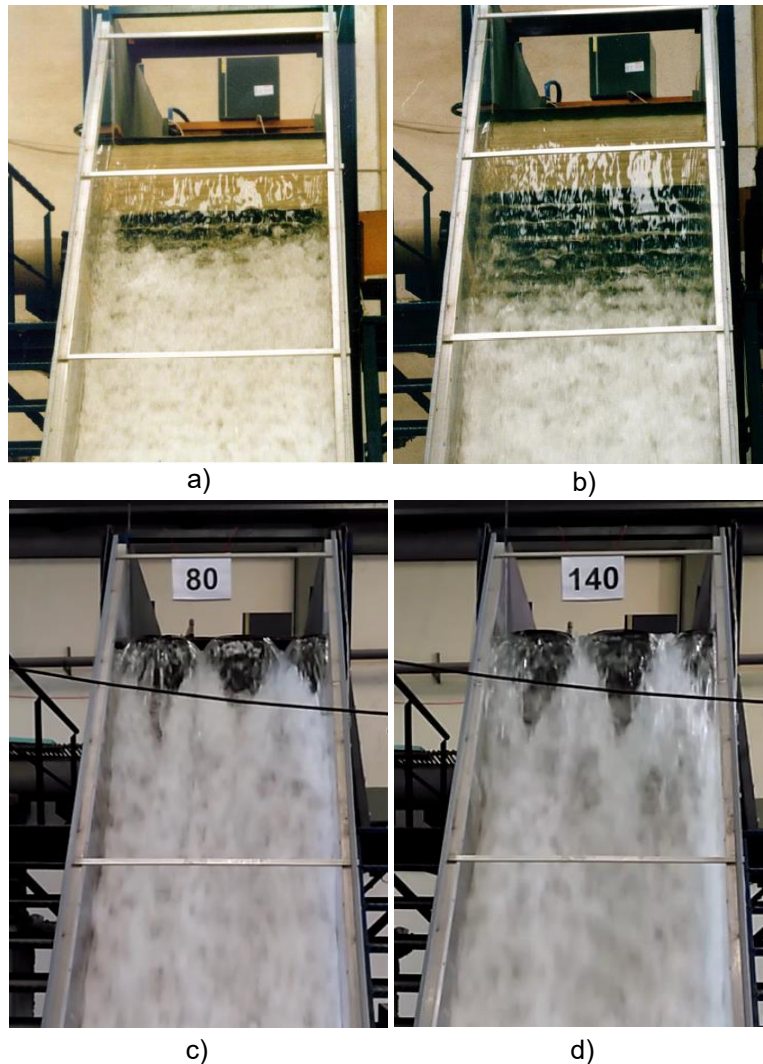


Figura 2.6 – escoamento deslizante sobre turbilhões em descarregadores de cheias em degraus: a) soleira descarregadora do tipo WES, para $h_d=8$ cm e $Q=80$ l/s (Matos, 1999); b) soleira descarregadora do tipo WES, para $h_d=8$ cm e $Q=140$ l/s (Matos, 1999); c) soleira descarregadora do tipo PKW, para $h_d=4$ cm e $Q=80$ l/s; d) soleira descarregadora do tipo PKW, para $h_d=4$ cm e $Q=140$ l/s.

Reis (2015) identificou três trechos distintos ao longo do descarregador de degraus (por meio de observação do escoamento e análise dos perfis de concentração de ar):

- o primeiro trecho, imediatamente a jusante da soleira descarregadora, em que o escoamento proveniente das teclas interiores dá lugar a jatos de água que atingem o canal descarregador a uma curta distância a jusante, enquanto que o escoamento proveniente das teclas exteriores dá lugar a um escoamento de emulsão ar-água deslizante sobre o canal descarregador;
- o segundo trecho, a jusante do primeiro trecho, em que o escoamento deslizante de emulsão ar-água ocupa a totalidade da secção transversal, mantendo a tridimensionalidade provocada pelo escoamento nas teclas interiores e exteriores;
- o terceiro trecho, em que a tridimensionalidade do escoamento deslizante de emulsão ar-água é mitigada, aproximando-se de um escoamento bidimensional.

2.4. Bacias de dissipação de energia por ressalto hidráulico

2.4.1. Ressalto hidráulico

A dissipação de energia na bacia de dissipação dá-se pela passagem brusca de um escoamento em regime rápido (a montante) para um regime lento (a jusante), denominado ressalto hidráulico. O ressalto hidráulico pode ser classificado em cinco tipos (Peterka, 1958) de acordo com o valor do número de Froude na secção a montante do ressalto (Tabela 2.3).

Tabela 2.3 – Classificação do ressalto hidráulico (Peterka, 1958, *in* Cardoso, 2007).

Tipo de Ressalto	$F_{r_{mr}}$	h_{jr} / h_{mr}	L / h_{jr}	$(E_{mr} - E_{jr}) / E_{jr}$	Observações
Ondulado	> 1,00 < 1,70	> 1,00 < 1,80	> 3,00 < 4,00	> 0 < 0,05	Apresenta uma superfície ondulada.
Fraco	≥ 1,70 < 2,50	> 1,80 < 3,00	> 4,00 < 4,80	> 0,05 < 0,18	Apresenta uma série de pequenos rolos à superfície. Pequena dissipação de energia.
Oscilante	≥ 2,50 < 4,50	> 3,00 < 5,80	> 4,80 < 5,90	> 0,18 < 0,45	Produz ondas que se propagam para jusante.
Estável	≥ 4,50 < 9,00	> 5,80 < 12,20	6,00	> 0,45 < 0,70	Não apresenta ondas para jusante.
Forte	≥ 9,00 < 13,00	> 12,20 < 18,00	6,00	> 0,70 < 0,80	Projeções de água e ondas.

Nota: E_{jr} , energia específica na secção de jusante do ressalto; E_{mr} , energia específica na secção de montante do ressalto; $F_{r_{mr}}$, número de Froude na secção de montante do ressalto; h_{jr} , altura do escoamento na secção de jusante do ressalto; h_{mr} , altura do escoamento na secção de montante do ressalto; L , comprimento do ressalto.

O número de Froude na secção de montante do ressalto, $F_{r_{mr}}$, é dado por:

$$F_{r_{mr}} = \frac{U_{mr}}{\sqrt{g h_{mr}}} \quad (2.1)$$

em que g é a aceleração da gravidade, h_{mr} a altura do escoamento na secção de montante do ressalto e U_{mr} a velocidade média do escoamento na secção de montante do ressalto.

Nos ensaios experimentais realizados no presente estudo verificou-se que o ressalto hidráulico que ocorre na bacia de dissipação é do tipo estável, analogamente ao observado em Meireles (2004), Cardoso (2007) e Pinto (2017).

2.4.2. Tipos de bacias de dissipação de energia por ressalto hidráulico

Os tipos de bacias de dissipação propostas pelo *United States Bureau of Reclamation* (USBR) em 1987 dividem-se em bacias de dissipação de energia sem acessórios (tipo I do USBR, em que apenas ocorre ressalto livre) e bacias de dissipação de energia com acessórios (com três tipos) (Tabela 2.4).

Tabela 2.4 – Tipos de bacias de dissipação de energia por ressalto hidráulico com acessórios propostas pelo *United States Bureau of Reclamation* (Peterka, 1958, in Lencraste, 1996).

Tipo	$F_{r_{mr}}$	U_{mr} (m/s)	q (m ² /s)
II	> 4,5	< 33	-
III	> 4,5	< 18	< 18
IV	> 2,5 < 4,5	< 15	-

Nota: $F_{r_{mr}}$, número de Froude na secção de montante do ressalto; q , caudal unitário; U_{mr} , velocidade média na secção de montante do ressalto.

No estudo realizado por Pinto (2017) foram utilizadas bacias de dissipação de energia por ressalto hidráulico dos tipos I e III do USBR. Os acessórios que definem a bacia do tipo III do USBR são os blocos de queda, os blocos de impacto e a soleira terminal (Figura 2.7).

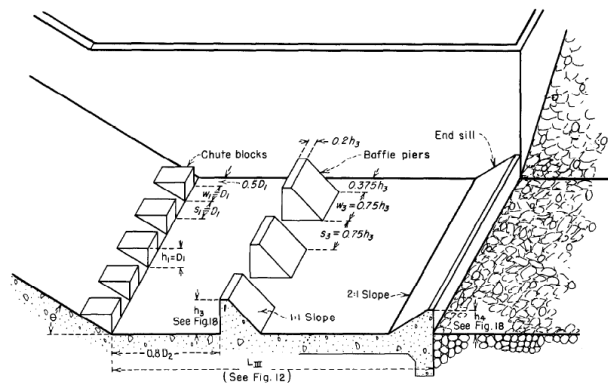


Figura 2.7 – Definição esquemática de uma bacia de dissipação de energia por ressalto hidráulico do tipo III do *United States Bureau of Reclamation* (Peterka, 1958).

Pinto (2017) não incluiu blocos de queda na bacia de dissipação de energia pelo facto de se tratar de um descarregador de cheias em degraus. De acordo com Peterka (1958), os blocos de queda têm o objetivo de fragmentar o escoamento em diferentes jatos com direções variadas, por forma a aumentar a turbulência e conseqüentemente a dissipação de energia. Contudo, estudos anteriores (e.g., Meireles, 2011, Sun, 2011) evidenciam que o descarregador de cheias em degraus permite suprimir os blocos de queda, devido à dissipação de energia que se dá ao longo do descarregador, com elevada fragmentação do escoamento e emulsão de ar.

O dimensionamento da bacia de dissipação de energia por ressalto hidráulico do tipo III do USBR utilizada por Pinto (2017) (Figura 2.8), já havia sido realizado em trabalhos anteriores (e.g., Meireles, 2011, Sun, 2011), em que parte do objetivo desses estudos incidiu na avaliação da necessidade de incluir blocos de queda em bacias do tipo III do USBR. A conclusão obtida por estes autores foi idêntica, ou seja, a instalação de blocos de queda a jusante de um descarregador em degraus tem uma influência desprezável nas condições de escoamento na bacia.

No estudo desenvolvido por Pinto (2017) analisou-se o impacto da utilização de uma bacia de dissipação com acessórios (Figura 2.8) em relação a uma bacia de dissipação sem acessórios. Pinto (2017) concluiu que a utilização de acessórios na bacia de dissipação permitiu a redução das alturas piezométricas a jusante do ressalto hidráulico entre 5% a 19% em relação aos resultados obtidos na bacia de dissipação sem acessórios.



Figura 2.8 – Bacia de dissipação de energia com acessórios (Pinto, 2017).

2.5. Energia específica residual

A altura equivalente de água e a energia específica residual na secção de montante do ressalto hidráulico podem ser obtidas através das seguintes hipóteses (Meireles, 2004):

- hipótese A, em que se considera que na aplicação da equação de conservação da quantidade de movimento entre a secção de montante e de jusante do ressalto hidráulico, a distribuição de pressões é hidrostática nas duas secções;
- hipótese B, em que se considera que na aplicação da equação de conservação da quantidade de movimento entre a secção de montante e de jusante do ressalto hidráulico, a distribuição de pressões é hidrostática na secção de jusante do ressalto hidráulico e na secção imediatamente a montante do ressalto varia linearmente entre o valor nulo à superfície livre e o valor da altura piezométrica medido na soleira da bacia de dissipação.

Para a hipótese de distribuição de pressões hidrostática (hipótese A) a equação de conservação da quantidade de movimento é dada por (Matos, 1999, Meireles, 2004):

$$\gamma \frac{h_{mr}^2}{2} + \alpha' \rho \frac{q^2}{h_{mr}} = \gamma \frac{h_{jr}^2}{2} + \alpha' \rho \frac{q^2}{h_{jr}} \quad (2.2)$$

em que h_{jr} é a altura do escoamento na secção imediatamente a jusante do ressalto hidráulico, h_{mr} a altura equivalente de água na secção imediatamente a montante do ressalto, q o caudal unitário de água, α' o coeficiente de quantidade de movimento, γ o peso volúmico da água e ρ a massa volúmica da água.

Para a hipótese de distribuição de pressões linear (hipótese B) a equação de conservação da quantidade de movimento é dada por (Meireles, 2004):

$$\gamma h_{mr} \frac{h_{mr}^{piez}}{2} + \alpha' \rho \frac{q^2}{h_{mr}} = \gamma \frac{h_{jr}^2}{2} + \alpha' \rho \frac{q^2}{h_{jr}} \quad (2.3)$$

em que h_{mr}^{piez} a altura piezométrica medida na soleira da bacia de dissipação na secção imediatamente a montante do ressalto hidráulico.

Para determinar a altura do escoamento na secção imediatamente a jusante do ressalto hidráulico é necessário localizar o fim do ressalto hidráulico. Para a localização do fim do ressalto hidráulico utilizou-se o critério proposto em Cardoso (2007), que se baseou na obtenção de um valor inferior a 5% do declive da altura piezométrica média na bacia de dissipação em função da distância, dado por:

$$d_n = \frac{\frac{p_{n+1}}{\gamma} + \frac{p_n}{\gamma}}{s_{n+1} - s_n} \quad (2.4)$$

em que s é a distância ao pé do descarregador e p/γ a altura piezométrica.

Por outro lado, considera-se que a altura piezométrica imediatamente a montante do ressalto hidráulico corresponde ao valor máximo da altura piezométrica medida no trecho de impacto do escoamento proveniente do descarregador, para uma situação de ressalto hidráulico sem afogamento.

A altura equivalente de água a montante do ressalto hidráulico é obtida a partir da equação de conservação da quantidade de movimento (Equação 2.2 ou 2.3).

Para a situação em que o ressalto se forma imediatamente a jusante do descarregador, a energia específica residual (E_r) no pé do descarregador pode ser estimada através das Equações (2.5), (2.6) e (2.7) (Manzanares, 1980, Yasuda e Ohtsu, 1999, 2003, *in* Meireles, 2004).

$$E_r = \beta h_{mr} + \alpha \frac{U_{mr}^2}{2g} \quad (2.5)$$

$$\beta = 1 + \frac{1}{\rho g q h_{mr}} \int_0^{h_{mr}} V \Delta p \, dy \quad (2.6)$$

$$U_{mr} = \frac{q}{h_{mr}} \quad (2.7)$$

em que g é a aceleração gravítica, h_{mr} a altura equivalente de água na secção imediatamente a montante do ressalto hidráulico, q o caudal unitário de água, U_{mr} a velocidade média da água na secção imediatamente a montante do ressalto, V a velocidade da água à distância y da soleira, y a coordenada medida segundo a normal à bacia de dissipação, α o coeficiente da energia cinética, β o coeficiente de Jaeger-Manzanares e Δp a diferença entre a pressão real e a correspondente à distribuição hidrostática, à distância y da soleira.

De acordo com Yasuda e Ohtsu (2003), a distribuição de velocidades (V) obtida experimentalmente calcula-se através da equação (*in* Meireles, 2004):

$$V = \frac{9}{8} U_{mr} \left(\frac{y}{h_{mr}} \right)^{1/8} \quad (2.8)$$

em que h_{mr} é a altura equivalente de água na secção imediatamente a montante do ressalto hidráulico, U_{mr} a velocidade média da água na secção imediatamente a montante do ressalto e y a coordenada medida segundo a normal à bacia de dissipação.

Considerando que a distribuição de pressões, na secção de montante do ressalto hidráulico, varia linearmente entre o valor nulo à superfície livre e o valor medido na soleira da bacia de dissipação, obtém-se Δp , à distância y da soleira, através da equação (Yasuda e Ohtsu 1999, 2003, *in* Meireles, 2004):

$$\Delta p = \rho g (h_{mr}^{piez} - h_{mr}) \left(1 - \frac{y}{h_{mr}} \right) \quad (2.9)$$

em que g é a aceleração gravítica, h_{mr} a altura equivalente de água na secção imediatamente a montante do ressalto hidráulico, h_{mr}^{piez} a altura piezométrica medida na soleira da bacia de dissipação na secção imediatamente a montante do ressalto hidráulico, y a coordenada medida segundo a normal à bacia de dissipação e ρ a massa volúmica da água.

Meireles (2004) obteve valores dos coeficientes da energia cinética (α) e de quantidade de movimento (α') aproximadamente iguais à unidade, tendo sido utilizado $\alpha = \alpha' = 1$.

3. Instalação experimental, equipamento de medição e programa de ensaios

3.1. Considerações prévias

No presente capítulo, procede-se a uma explicação sucinta dos elementos que compõem a instalação experimental e dos equipamentos de medição utilizados neste estudo. Para uma descrição mais completa pode recorrer-se aos estudos anteriores de Matos (1999) ou Meireles (2004).

A realização dos ensaios experimentais decorreu na instalação experimental construída em 1998 ao abrigo do projeto INAG/CEHIDRO-IST/LNEC “Descarregadores de Barragens em Degraus” e encontra-se situada no pavilhão de modelos exteriores do Núcleo de Recursos Hídricos e Estruturas Hidráulicas (NRE) do Laboratório Nacional de Engenharia Civil, em Lisboa.

Ao longo dos anos foram efetuadas modificações na instalação experimental de modo a adaptar-se aos diferentes estudos que se seguiram ao projeto inicial de Matos (1999).

A principal alteração em relação à instalação inicial ao nível da soleira descarregadora foi efetuada no âmbito da dissertação de Reis (2015), tendo a soleira do tipo WES sido substituída por uma soleira do tipo PKW.

3.2. Descrição geral da instalação experimental

A instalação experimental é, no essencial, constituída pelo reservatório de entrada, soleira descarregadora, descarregador em degraus, bacia de dissipação e canal de regularização. Na Figura 3.1 apresenta-se a planta, alçado principal e corte transversal da instalação experimental.

O pavilhão de modelos exteriores do Núcleo de Recursos Hídricos e Estruturas Hidráulicas do LNEC (NRE) está dotado de um circuito hidráulico para abastecimento dos modelos. O circuito é composto por um reservatório de alimentação elevado e de nível constante com ligação aos vários modelos do pavilhão através de condutas de alimentação. A recolha da água é feita por um sistema de canais de recolha e recirculação que permitem a ligação com o reservatório de aspiração das bombas, que dispõe de um total de quatro bombas.

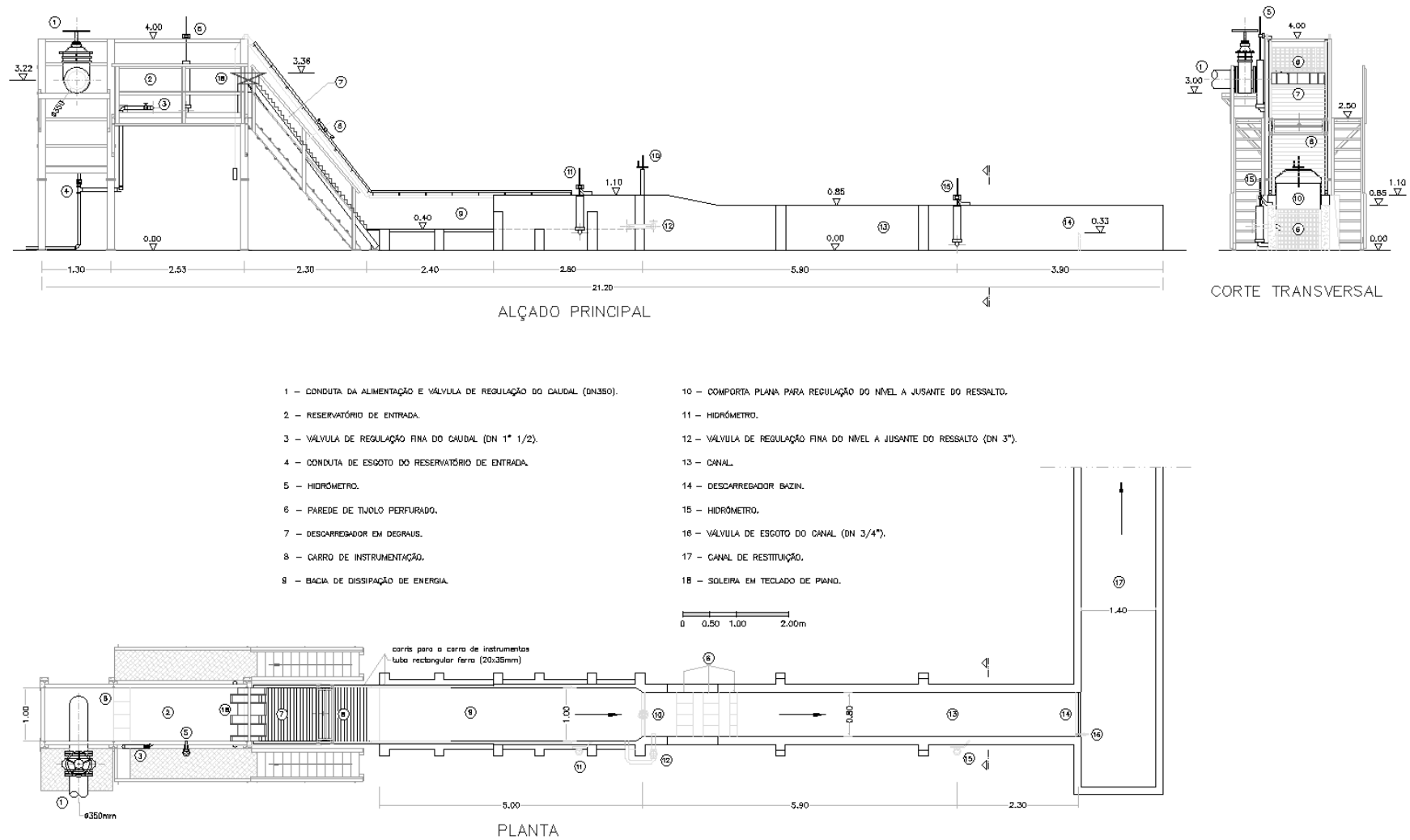


Figura 3.1 – Instalação experimental: planta, alçado principal e corte transversal (adaptado de Matos, 1999).

O circuito de alimentação da instalação experimental tem início numa derivação da conduta principal do reservatório geral de alimentação e é composto por uma conduta de fibrocimento, com diâmetro interno de 350 mm. A conduta alimenta o reservatório de entrada da instalação, sendo o controlo do caudal feito pela manobra de uma válvula de cunha com diâmetro interno de 350 mm, instalada na conduta imediatamente a montante do reservatório de entrada.

O reservatório de entrada, estrutura metálica pré-fabricada (Figura 3.2a), encontra-se dividido em duas zonas, a câmara de tranquilização e a câmara principal. Esta divisão, feita por uma fiada de tijolos (Figura 3.2b), assegura que a aproximação do escoamento à soleira descarregadora seja efetuada sem turbulência. Ainda com o objetivo de reduzir a agitação do escoamento na câmara principal, o abastecimento do reservatório de entrada é realizado através de uma curva circular de fibra de vidro em consola (Figura 3.2c) com o intuito de garantir que o abastecimento se dê em condições de afogamento.

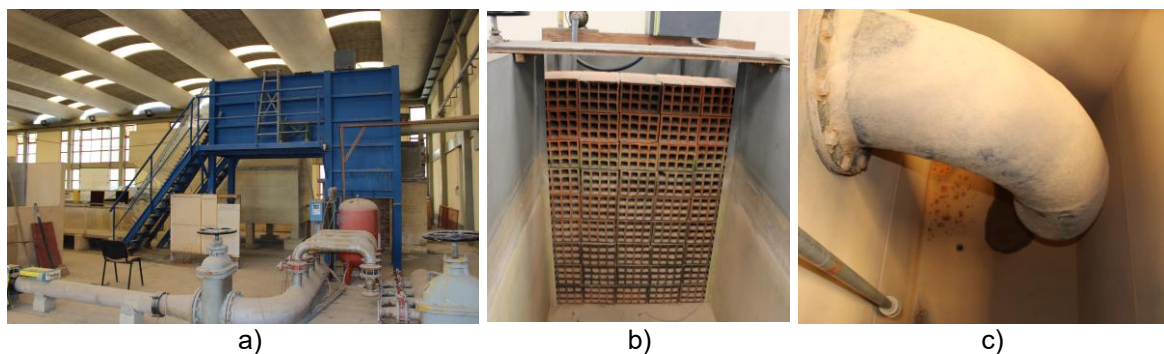


Figura 3.2 – Instalação experimental: a) reservatório de entrada; b) fiada de tijolos; c) conduta de abastecimento do reservatório de entrada.

O reservatório de entrada está equipado com duas válvulas de cunha com 1”1/2 de diâmetro, uma das quais colocada no fundo da câmara de tranquilização, para esvaziamento do reservatório de entrada, e a outra colocada na parede direita da câmara principal, para regulação fina do caudal escoado na instalação. Está também equipado com um hidrómetro, colocado à distância de 1,20 m do paramento vertical a montante da soleira descarregadora, para medição do nível de água.

O descarregador em degraus encontra-se a jusante do reservatório de entrada. A passagem do escoamento do reservatório de entrada para o descarregador em degraus faz-se através da soleira descarregadora do tipo PKW (Figura 3.3a).

O canal descarregador em degraus (Figura 3.3b) apresenta um declive constante ($1:0,75$; $\theta = 53,13^\circ$). Na presente dissertação foram utilizados degraus de 8 e de 4 cm de altura no trecho de declive constante. As paredes e degraus são em vidro acrílico (Figura 3.3c), permitindo a visualização do escoamento.

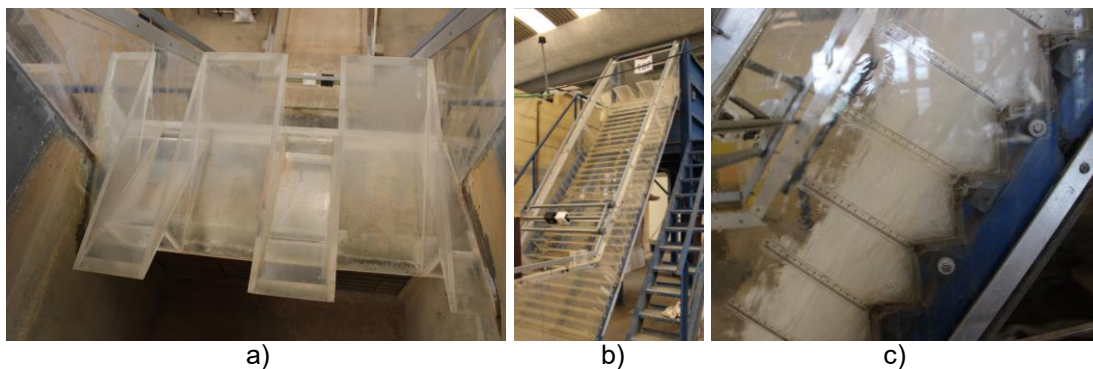


Figura 3.3 – Instalação experimental: a) soleira descarregadora em teclado de piano; b) descarregador em degraus; c) paredes laterais de vidro acrílico.

O carro de instrumentação (Figura 3.4a) é constituído por uma estrutura metálica, com quatro pares de semi-rodas de PVC nas extremidades, para permitir o deslizamento sobre os carris. Os carris permitem que seja efetuada a medição da concentração de ar na direção perpendicular à direção do escoamento no descarregador em degraus, já que a colocação de um porta sondas no carro de instrumentação permite efetuar a medição da concentração de ar para diferentes verticais (na direção perpendicular ao fundo fictício) do escoamento.

A bacia de dissipação de energia (Figura 3.4b) tem 5 m de comprimento, sendo composta por um trecho inicial de 0,34 m (com degraus de 8 cm) em vidro acrílico e os restantes 4,66 m formados por cinco lajetas de betão justapostas. As paredes com 0,70 m de altura são de vidro acrílico no trecho inicial de 2,40 de modo a permitir a visualização do ressalto hidráulico e de betão pintado a tinta de água nos restantes 2,60 m.

A largura da bacia de dissipação é de 1,00 m até à comporta plana (Figura 3.4c) instalada para controlo da altura de escoamento na bacia de dissipação, ligeiramente a montante da qual o canal sofre uma redução gradual para 0,80 m.

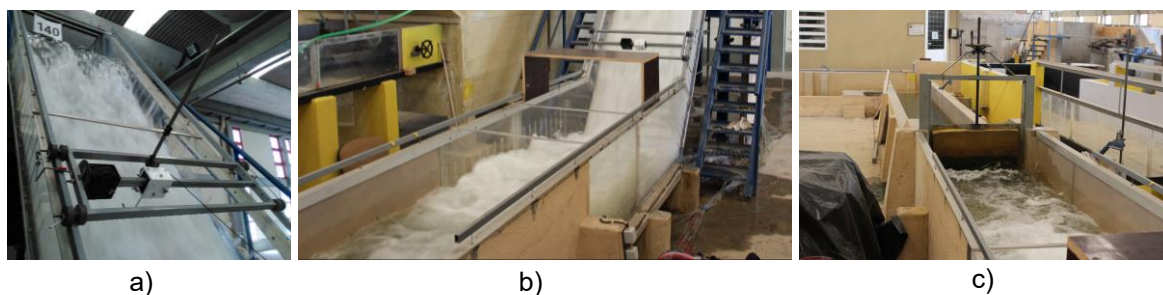


Figura 3.4 – Instalação experimental: a) carro de instrumentação; b) bacia de dissipação de energia; c) comporta plana a jusante da bacia de dissipação de energia.

A jusante da comporta plana dá-se um desnível de 0,40 m para o canal de regularização com 0,80 m de largura e 8,20 m de comprimento (Figura 3.5). A jusante do canal está instalado um descarregador *Bazin* (Figura 3.5c) que permite a medição do caudal que circula na instalação. A medição é feita através da leitura do nível de água sobre a crista do descarregador num hidrómetro colocado a 2,30 m a montante do descarregador, cerca de nove vezes a carga máxima de funcionamento. Na

determinação da lei de vazão do descarregador seguiu-se o proposto pela “*Société des Ingénieurs et Architectes Suisses*”, em 1947 (Lencastre, 1996, p. 328; Quintela, 1998, p. 321, *in* Matos, 1999).

O canal de regularização dispõe de três fiadas de tijolos, colocados no início do canal com vista à redução da turbulência do escoamento (Figura 3.5). Foi colocada uma esteira flutuante de madeira na terceira fiada de tijolos, para dissipar as ondas superficiais que resultam de caudais mais elevados. A extremidade de jusante da esteira encontra-se a uma distância igual a 20 vezes a carga máxima sobre a crista do descarregador *Bazin*. A jusante do canal está instalada uma válvula de cunha com diâmetro de 3/4”, para esvaziamento do canal de regularização.

O circuito de restituição consiste num canal de restituição, localizado imediatamente a jusante do descarregador *Bazin*, que conduz o caudal escoado ao canal de recirculação do pavilhão de modelos exteriores do NRE.

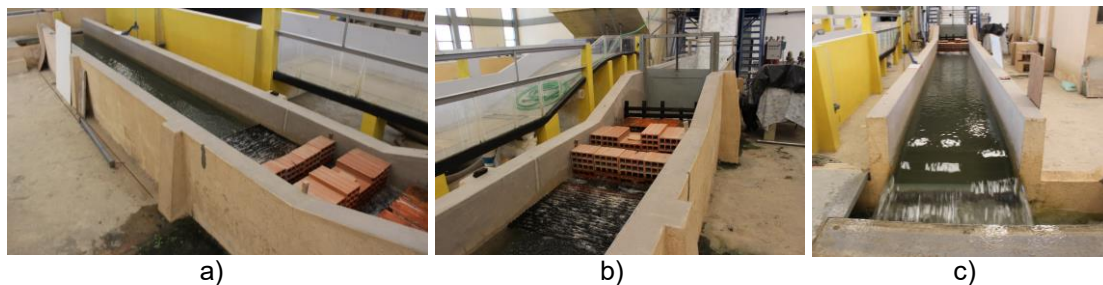


Figura 3.5 – Instalação experimental: a) canal de regularização; b) tranquilização do escoamento no canal de regularização; c) descarregador *Bazin* a jusante do canal de regularização.

3.3. Soleira descarregadora do tipo PKW

A soleira descarregadora foi dimensionada de acordo com a proposta de Machiels (2012), no âmbito da dissertação de Reis (2015). Segundo Machiels (2012) a relação P/W_u é usada como base de pré-dimensionamento de forma a garantir a otimização da estrutura do ponto de vista técnico-económico, tendo sido adotado o valor $P/W_u \approx 0,5$ recomendado por Machiels (2012) para soleiras de baixa altura (recomendadas para uso em projetos de reabilitação). Adotou-se o valor de 0,20 m para a altura da soleira ($P = P_i = P_o$), tendo em atenção as limitações construtivas impostas pela instalação experimental.

De acordo com Machiels (2012) a relação entre a largura das teclas interiores e exteriores (W_i/W_o) deve estar dentro do intervalo 1,25 e 1,50, ou seja, sabendo que $W_u = W_i + W_o + 2T_s$ é possível determinar a largura das teclas interiores e exteriores para este caso de estudo. A relação L/W , segundo Machiels (2012), deve estar compreendida entre 4 e 5, e a relação B_o/B_i deve ser igual a 1.

Na Tabela 3.1 encontram-se as principais características da soleira descarregadora do tipo PKW dimensionada no âmbito da dissertação de Reis (2015).

Tabela 3.1 – Características da soleira descarregadora do tipo PKW do presente estudo.

W_u (m)	W (m)	L (m)	B (m)	$\frac{B_o}{B_i}$	W_i (m)	W_o (m)	T_s (m)	P (m)	B_i (m)	B_o (m)	$\frac{W_i}{W_o}$	$\frac{P}{W_u}$	$\frac{2 T_s}{L}$	$\frac{L}{W}$
0,392	1,000	4,290	0,670	1,00	0,221	0,147	0,012	0,200	0,134	0,134	1,503	0,510	0,014	4,290

Nota: as grandezas encontram-se definidas na Figura 2.3 e na Tabela 2.2.

Na Figura 3.6 é possível observar a constituição da soleira, sendo composta por duas teclas exteriores, duas teclas interiores e duas metades em contacto com as paredes laterais do canal descarregador.

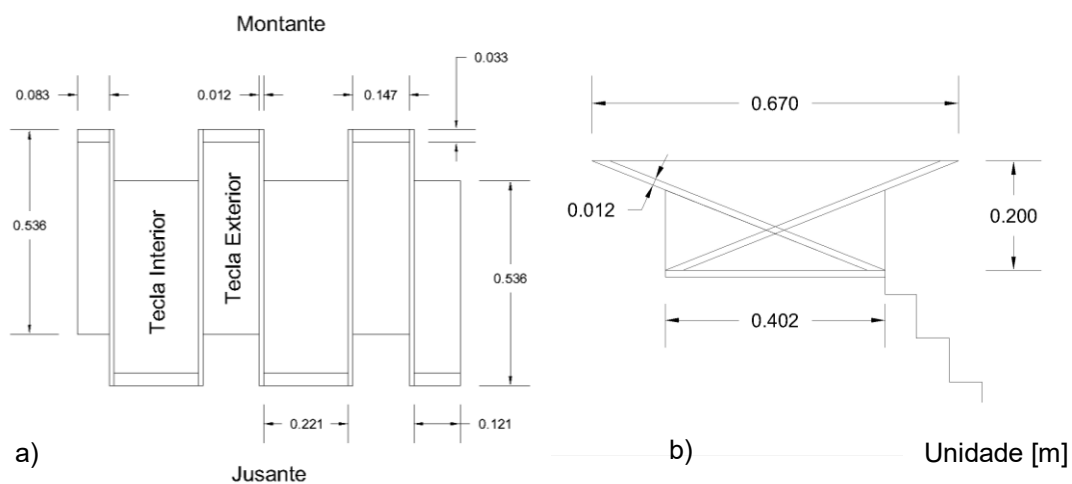


Figura 3.6 – Soleira descarregadora do tipo PKW do presente estudo: a) planta; b) alçado.

A crista encontra-se à cota de 3,36 m, segundo o referencial apresentado na Figura 3.1. A ligação entre a soleira descarregadora e o descarregador em degraus é feita por meio de um degrau de 4 cm de altura.

Com o objetivo de permitir a visualização do escoamento sobre a soleira descarregadora do tipo PKW utilizou-se vidro acrílico, com espessura de 12 mm (T_s).

3.4. Sistema de medição e de aquisição digital da concentração de ar

3.4.1. Sonda de deteção de bolhas de ar e respetiva pseudo-calibração

Os equipamentos utilizados para a medição e aquisição digital da concentração de ar encontram-se representados na Figura 3.7. No presente subcapítulo procede-se a uma breve descrição das características e funcionamento dos equipamentos utilizados.



Figura 3.7 – Equipamentos usados para medição da concentração de ar: a) aparelhagem utilizada para a aquisição digital da concentração de ar; b) sonda de ar em funcionamento.

A sonda de deteção de bolhas de ar utilizada no presente estudo é a mesma dos estudos de Meireles (2004) e Reis (2015). Meireles (2004) descreve detalhadamente a sonda de deteção de bolhas de ar desenvolvida pelo USBR e as melhorias implementadas na conceção da sonda em relação a versões anteriores.

O funcionamento da sonda assenta no conceito da diferença entre a resistência eléctrica do ar e da água. A ponteira da sonda é composta por dois eléctrodos de platina, com 0,2 mm de diâmetro, que se encontram sobre uma tensão eléctrica com uma resistência limitadora; quando um ou ambos dos eléctrodos são atravessados por uma bolha de ar origina-se um aumento de tensão entre os eléctrodos. A concentração de ar é definida como a percentagem do tempo em que a extremidade de cada eléctrodo (ou de ambos, simultaneamente) está em contacto com o ar, relativamente ao tempo total de medição.

O aparelho desenvolvido pelo USBR (Figura 3.8) permite a leitura da concentração de ar, tendo sofrido uma adaptação em Matos (1999) com o objetivo de permitir a aquisição de dados por computador (com uma frequência de amostragem de 30 kHz por canal de aquisição, com posterior filtragem a 30 Hz), permitindo estimativas mais exatas daquelas grandezas.

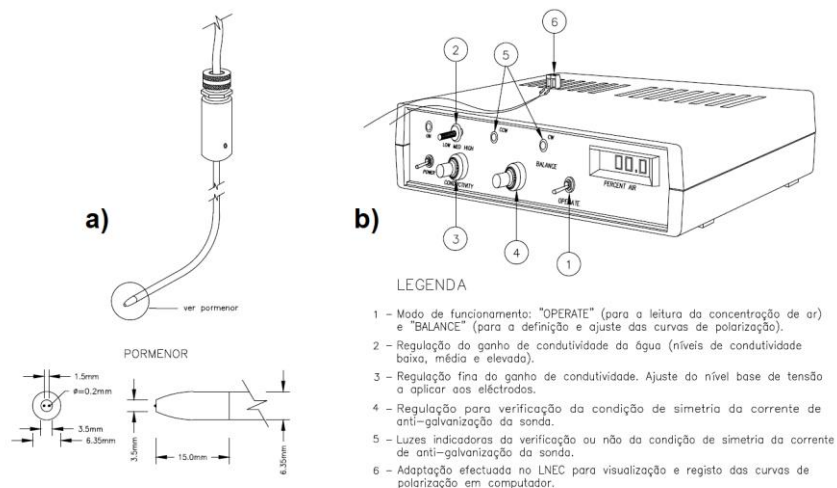


Figura 3.8 – Representação esquemática da aparelhagem de medição da concentração de ar: a) sonda de ar; b) aparelho eletrônico de detecção de bolhas de ar (Matos, 1999).

Para a aquisição em computador dos dados provenientes da sonda de detecção de bolhas de ar, utilizou-se a interface de aquisição de dados DI-220, desenvolvido pela DATAQ Instruments Inc., que em conjunto com o *software WinDaq/Lite Data Acq*, desenvolvido pela mesma entidade, permitiu a aquisição de dados em tempo real, para um intervalo de tempo definido pelo utilizador. Através do *software WinDaq Waveform Browser*, complementar ao *software* anterior, efetuou-se um tratamento estatístico aos dados obtidos, de onde se retirou o valor médio temporal de concentração de ar para cada ponto da vertical.

No estudo de Meireles (2004), recorreu-se a uma pseudo-calibração da sonda de ar, que consistiu em obter a relação entre os valores de concentração de ar obtidos diretamente com a sonda de ar (valores não calibrados, C_{sonda}) e os obtidos por Matos (1999) na mesma instalação e para idênticas condições (canal descarregador, posição da sonda e caudal escoado), após aplicação da curva de calibração obtida no calibrador desenvolvido no USBR (que relaciona a concentração de ar obtida no calibrador, $C_{calibrador}$, com C_{sonda}).

No estudo de Reis (2015), analisou-se a aplicabilidade da curva de pseudo-calibração obtida por Meireles (2004). Para o efeito, procedeu-se a um novo conjunto de ensaios no descarregador em degraus com a soleira descarregadora do tipo WES, tendo-se efetuado medições nas verticais dos degraus 19 e 30. Compararam-se as concentrações de ar obtidas pela sonda (valores não calibrados) com os resultados obtidos por aplicação da curva de pseudo-calibração por Meireles (2004), em idênticas condições. Os resultados obtidos por Reis (2015) foram análogos aos apresentados por Meireles (2004). Desta forma, aplicou-se também neste estudo a curva de pseudo-calibração proposta por Meireles (2004), dada por:

$$C_{calibrador} = 0,1086 C_{sonda}^3 + 0,9056 C_{sonda}^{1/2} \quad (3.1)$$

3.4.2. Metodologia de experimentação

De acordo com o USBR, deverá ser efetuada uma calibração da sonda antes de se iniciar os ensaios. A calibração prévia da sonda consiste no ajustamento do ganho de condutividade e da corrente de antigalvanização da mesma, com o objetivo de adaptar a sonda às alterações que ocorrem ao nível da condutividade da água para diferentes ensaios.

Em primeiro lugar, a sonda deve ser imersa em água parada e isenta de bolhas de ar, devendo ser ajustado o ganho de condutividade para um valor compreendido entre 50,0 e 60,0 (valor lido no visor do aparelho em modo “Balance”). Preferencialmente esse valor deve aproximar-se de 50,0, correspondendo a uma tensão elétrica interna de cerca de 5 V. Em simultâneo, deve ser feito o acerto da corrente de anti-galvanização.

Na verificação do funcionamento, deverão corresponder os valores 0,0 e 100,0 (lidos no visor do aparelho em modo “Operate”) no caso da sonda se encontrar imersa e emersa, respetivamente. Os valores lidos no visor correspondem aos valores de concentração de ar em percentagem (em modo “Operate”).

Seguiu-se a calibração prévia proposta por Reis (2015) para uma soleira descarregadora do tipo PKW, que teve como base estudos precedentes na mesma instalação, para uma soleira descarregadora do tipo WES (Matos, 1999, Meireles, 2004 e Renna, 2004).

Para a calibração prévia e realização dos ensaios preliminares com a soleira do tipo PKW, aplicou-se a metodologia adotada por Reis (2015), nomeadamente:

- calibração da sonda no descarregador e colocação da ponteira da sonda imersa no escoamento da tecla interior da soleira descarregadora (Figura 3.9a);
- escolha do valor da tensão de deteção base, devendo para a presente sonda estar compreendido entre 4,9 a 5,0 V, ou seja, cerca de 0,4 V acima do limiar de deteção de bolhas de ar;
- colocação, em cada vertical, da sonda junto do fundo (à distância de 0,32 cm da extremidade do degrau) (Figura 3.9b) para visualização e registo das curvas de polarização em computador e, se necessário, para nivelamento das mesmas, por forma a satisfazer a condição de simetria da corrente de anti-galvanização da sonda;
- realização do ensaio, de 1,5 minutos, durante o qual é efetuada a leitura do valor máximo e mínimo da concentração de ar no visor do aparelho em simultâneo com a aquisição em computador, à frequência de 30 kHz (com posterior filtro para 30Hz);
- a concentração de ar obtém-se por aplicação da equação de calibração (Equação 3.1) ao valor obtido pela sonda.



Figura 3.9 – Posição da sonda de ar para: a) calibração prévia com soleira descarregadora do tipo PKW; b) nivelamento das curvas de polarização em computador.

3.5. Programa de ensaios

3.5.1. Escoamento deslizante sobre turbilhões

Para o estudo do escoamento no descarregador em degraus foram medidas as concentrações de ar nas verticais (perpendiculares ao fundo fictício) dos degraus.

O programa de ensaios seguido foi idêntico ao de Reis (2015), tendo como objetivo comparar perfis de concentração de ar em idênticas posições do descarregador, para degraus de 4 e 8 cm de altura (Tabela 3.2). Por forma a simplificar a comparação de concentrações de ar com Reis (2015), Meireles (2004) e Matos (1999), manteve-se a numeração atribuída aos degraus de 8 cm de altura.

As medições foram efetuadas ao longo dos eixos das teclas centrais, nomeadamente numa tecla exterior e numa tecla interior.

Tabela 3.2 – Programa de ensaios para a medição de concentração de ar ao longo do descarregador em degraus.

Q (l/s)	Vertical (número do degrau)	Número de pontos por vertical	
		Tecla exterior	Tecla interior
80	15	21	21
	17	21	21
	19	18	18
	21	15	15
	24	15	15
	27	15	15
	30	16	16
	32	16	16
140	19	21	21
	21	18	20
	24	20	18
	27	18	16
	30	18	16
	32	18	18

Nota: A vertical (número do degrau) refere-se à numeração atribuída aos degraus de 8 cm de altura.

3.5.2. Ressalto hidráulico

Para o estudo do ressalto hidráulico na bacia de dissipação de energia foram medidas as alturas piezométricas (máximas e mínimas) e as alturas de escoamento (máximas e mínimas) na bacia de dissipação para os caudais de 80, 100, 120, 140, 160 e 180 l/s.

Foram realizadas medições para degraus com 4 e 8 cm de altura. Com degraus de 4 cm de altura foram efetuados ensaios para a situação de ressalto hidráulico livre e submerso. Com degraus de 8 cm de altura apenas se procedeu a medições para a situação de ressalto hidráulico livre.

Para a obtenção das alturas piezométricas na bacia de dissipação de energia foram utilizadas 67 tomadas de pressão colocadas ao longo da bacia de dissipação e ligadas a quadros manométricos com resolução de 1 mm reinstalados no âmbito desta dissertação. Das 67 tomadas, 28 estavam colocadas no trecho em betão e 39 no trecho em vidro acrílico da bacia de dissipação de energia. Para a medição das alturas de escoamento, foram usadas 18 réguas graduadas colocadas na parede em vidro acrílico.

Resolveu-se aplicar uma nova numeração para as 67 tomadas de pressão em relação aos estudos que antecederam o presente trabalho na mesma instalação experimental. Alterou-se a identificação das tomadas de pressão de forma a suprimir da numeração das tomadas de pressão que já não se encontravam operacionais e normalizar a numeração de tomadas de pressão colocadas recentemente no âmbito do trabalho de Pinto (2017) com as tomadas de pressão que já existiam em outros trabalhos.

No trecho de betão utilizou-se uma numeração de 1 a 28 para identificar as tomadas ao longo do eixo de simetria do canal.

No trecho de vidro acrílico aplicou-se um sistema de identificação em que longitudinalmente se identificam as tomadas com uma letra e, transversalmente, com um número. Nas Figuras 3.10 e 3.11 apresenta-se o sistema de identificação utilizado na bacia de dissipação de energia e na Figura 3.12 os quadros manométricos.

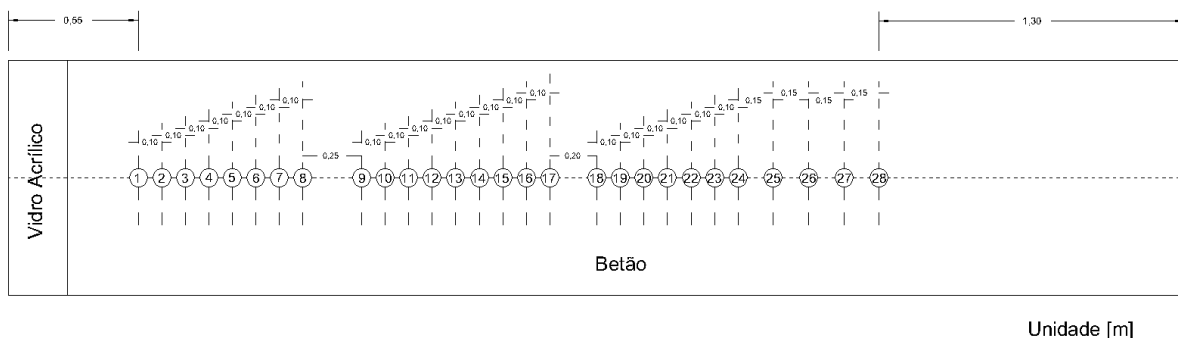


Figura 3.10 – Localização das tomadas de pressão no trecho em betão.

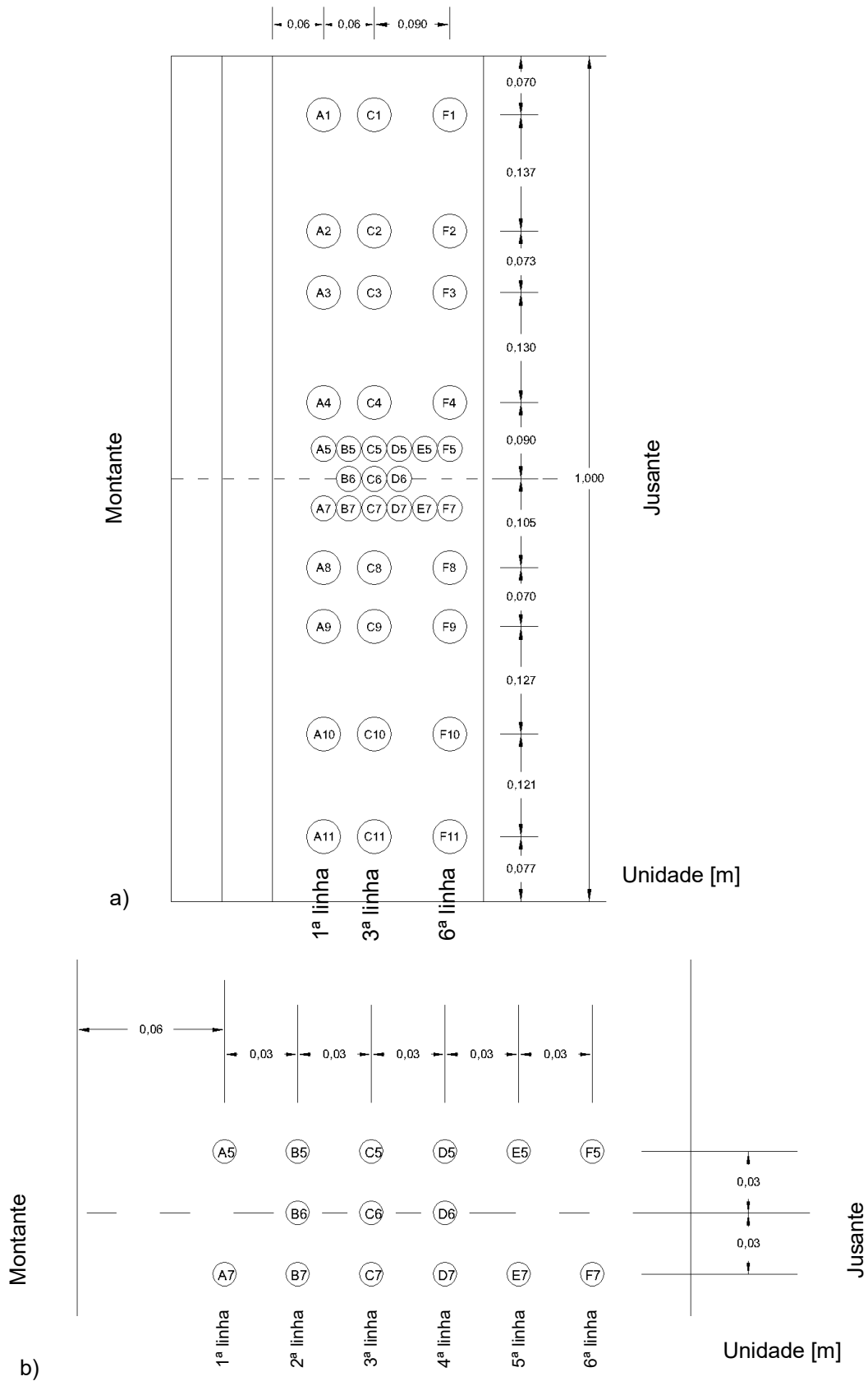


Figura 3.11 – Localização das tomadas de pressão no trecho inicial em vidro acrílico: a) globalidade das tomadas de pressão; b) pormenor das tomadas de pressão localizadas junto do eixo de simetria do canal (distâncias ao pé do descarregador para degraus de 8 cm de altura).



Figura 3.12 – Quadros manométricos da instalação experimental.

Para a obtenção das alturas piezométricas no quadro manométrico teve-se em conta o efeito de capilaridade dos tubos, tendo-se subtraído a sobreelevação resultante da capilaridade às leituras no quadro manométrico. Considerou-se uma sobreelevação de 6 mm, como obtido em Matos (1999).

Tabela 3.3 – Programa de ensaios para a caracterização do escoamento na bacia de dissipação de energia.

Q (l/s)	Leituras
80	Degraus com 8 cm de altura 67 tomadas de pressão 18 perfis graduados 1 posição do ressalto hidráulico
100	
120	
140	
160	
180	Degraus com 4 cm de altura 67 tomadas de pressão 18 perfis graduados 3 posições do ressalto hidráulico
80	
100	
120	
140	
160	
180	

4. Caracterização do escoamento no descarregador e na bacia de dissipação de energia

4.1. Considerações prévias

Neste capítulo apresentam-se os resultados obtidos para o programa de ensaios apresentado no subcapítulo 3.5, bem como se caracteriza o escoamento para um descarregador com degraus de 4 cm de altura a jusante de uma soleira descarregadora do tipo PKW.

O subcapítulo 4.2 incide sobre a caracterização do escoamento deslizante sobre turbilhões. Apresentam-se os perfis de concentração de ar, a concentração média de ar, as alturas representativas do escoamento de emulsão ar-água, e comparam-se os resultados deste estudo com outros obtidos na mesma instalação experimental, para diferentes condições geométricas do descarregador em degraus e da soleira descarregadora.

No subcapítulo 4.3 efetua-se a caracterização do escoamento na bacia de dissipação sem acessórios. Apresentam-se as alturas piezométricas na secção inicial do ressalto hidráulico, as alturas piezométricas ao longo da bacia de dissipação, a altura equivalente de água na secção de montante do ressalto hidráulico e a energia específica residual no pé do descarregador. Procedeu-se ainda à comparação dos resultados obtidos neste trabalho com os resultantes de outros estudos desenvolvidos na mesma instalação experimental.

4.2. Escoamento deslizando sobre turbilhões

4.2.1. Grandezas características do escoamento de emulsão ar-água

A caracterização do escoamento de emulsão ar-água é feita a partir da análise dos perfis de concentração de ar.

A concentração pontual de ar (C) é definida pelo volume de ar por unidade de volume de ar e de água.

A altura característica do escoamento de emulsão de ar-água (Y_{90}) define-se como sendo a altura, medida perpendicularmente à soleira de fundo fictícia do descarregador de degraus, a que corresponde a concentração de ar de 90%.

A altura equivalente de água (h) corresponde à altura que o escoamento teria se fosse composto unicamente por água, sendo definida pela expressão:

$$h = \int_0^{Y_{90}} (1 - C) dy \quad (4.1)$$

em que y é a distância à soleira de fundo fictícia.

A concentração média de ar (\bar{C}) na vertical, ou na secção transversal, se o escoamento for bidimensional, é dada por:

$$\bar{C} = \frac{\int_0^{Y_{90}} C dy}{Y_{90}} \quad (4.2)$$

Partindo das Equações (4.1) e (4.2), obtém-se:

$$h = (1 - \bar{C})Y_{90} \quad (4.3)$$

4.2.2. Distribuição da concentração de ar

Nas Figuras 4.1 a 4.4 apresentam-se os perfis de concentração de ar nos eixos de simetria das teclas exterior e interior, para o caudal de 80 l/s (Figuras 4.1 e 4.2) e para o caudal de 140 l/s (Figuras 4.3 e 4.4).

A análise das Figuras 4.1 a 4.4 permite verificar que, independentemente do caudal, o andamento dos perfis de concentração de ar no eixo de simetria da tecla exterior e da tecla interior são bastante distintos. Analogamente ao observado por Reis (2015), os valores da concentração de ar do escoamento proveniente da tecla exterior são superiores aos originados pela tecla interior, num trecho inicial. As diferenças são facilmente observadas para o caudal de 80 l/s nos degraus 15, 17 e 19 e para o caudal de 140 l/s nos degraus 19, 21 e 24. Esta diferença deve-se ao escoamento fortemente arejado proveniente da tecla exterior, que conduz a uma elevada concentração de ar nos degraus iniciais, enquanto que no escoamento proveniente da tecla interior, apenas se verifica entrada de ar quando este atinge o descarregador em degraus. O escoamento proveniente da tecla interior atinge o descarregador em degraus ligeiramente a montante do degrau 15 para o caudal de 80 l/s e ligeiramente a montante do degrau 19 para o caudal de 140 l/s.

Com base na análise da Figura 4.1, é possível formular as seguintes observações:

- os perfis de concentração de ar relativos aos degraus 15, 17 e 19 apresentam valores de concentração de ar consideravelmente superiores aos registados nos degraus a jusante;
- para distâncias à soleira até cerca de 3 cm, os valores de concentração de ar diminuem no sentido do escoamento entre os degraus 15 e 27, sendo neste último atingida a menor concentração de ar. Os valores de concentração de ar entre os degraus 27 e 32 sofrem uma ligeira subida, enquanto que os perfis de concentração de ar dos degraus 30 e 32 são próximos.

A análise da Figura 4.2 permite formular as seguintes observações:

- os perfis de concentração de ar relativos aos degraus 15, 17 e 19 para distâncias idênticas à soleira, superiores a cerca de 3 cm, apresentam valores de concentração de ar claramente inferiores aos obtidos para os restantes degraus;
- para distâncias à soleira até cerca de 3 cm, os valores de concentração de ar apresentam uma ligeira descida no sentido do escoamento entre os degraus 15 e 19, sofrendo um ligeiro aumento entre os degraus 19 e 24 e um forte aumento entre os degraus 24 e 30; os perfis de concentração de ar dos degraus 30 e 32 são próximos.

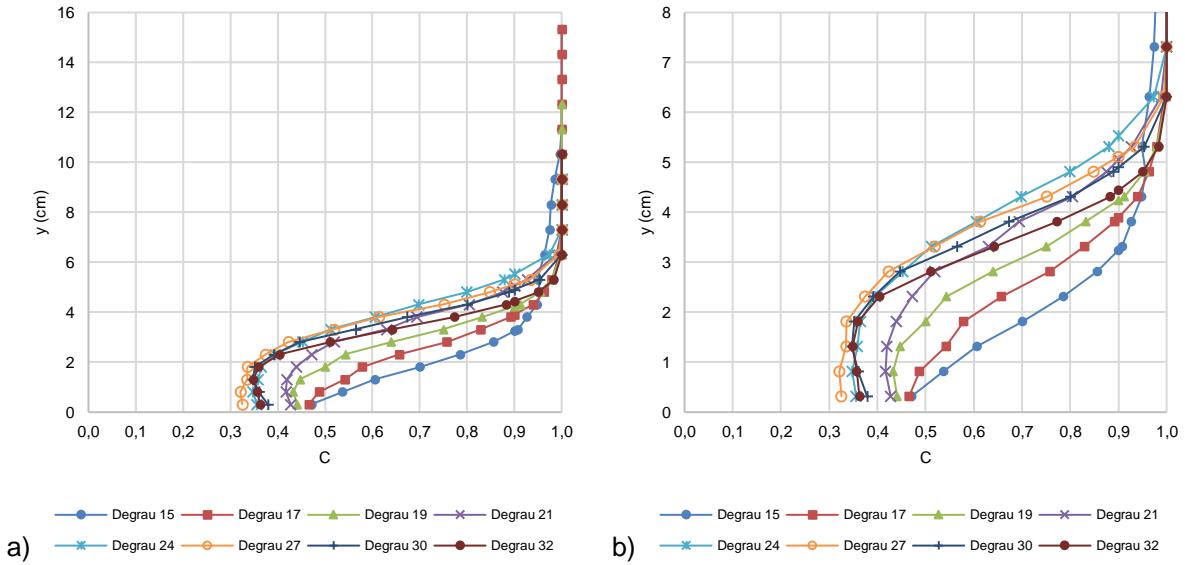


Figura 4.1 – Distribuição da concentração de ar no eixo de simetria da tecla exterior, para $Q=80$ l/s: a) perfil completo; b) região inferior do perfil.

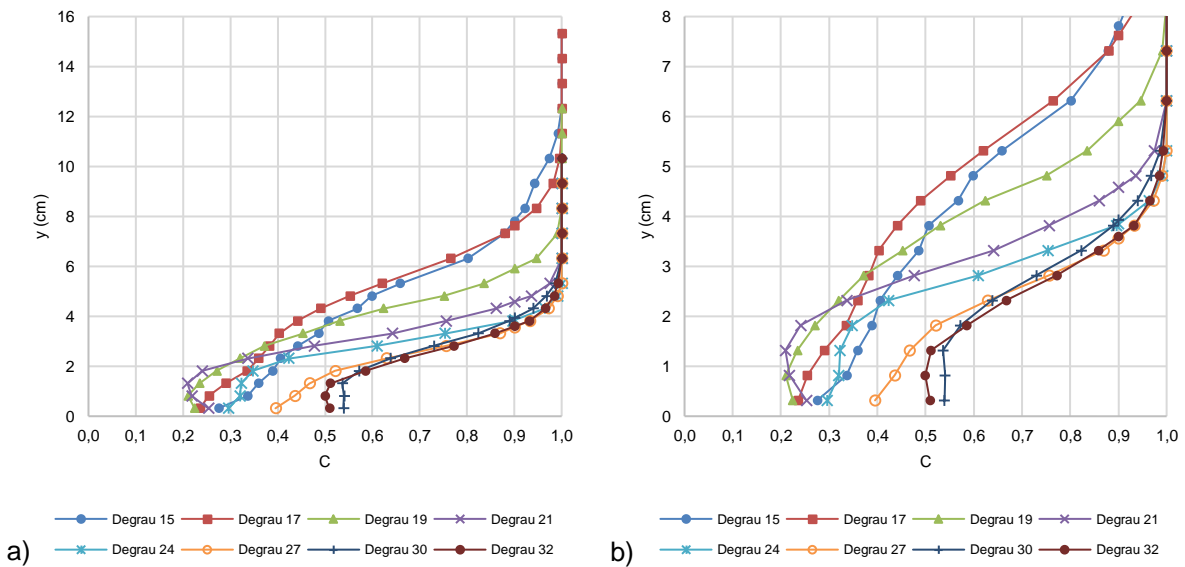


Figura 4.2 – Distribuição da concentração de ar no eixo de simetria da tecla interior, para $Q=80$ l/s: a) perfil completo; b) região inferior do perfil.

Com base na Figura 4.3 é possível formular as seguintes observações:

- para valores de y superiores a cerca de 2 cm e idêntica distância à soleira, os perfis de concentração de ar dos degraus 19 e 21 apresentam concentrações superiores aos dos restantes perfis, enquanto que para distâncias inferiores a cerca de 2 cm, os perfis de concentração de ar para todos os degraus, excetuando o degrau 21, não apresentam diferenças significativas;
- os perfis de concentração de ar dos degraus 27, 30 e 32 são relativamente próximos, o que permite concluir que o escoamento a jusante do degrau 27 será gradualmente variado.

A análise da Figura 4.4 permite formular as seguintes observações:

- para valores de y superiores a cerca de 3 cm e idêntica distância à soleira, os perfis de concentração de ar dos degraus 19, 21 e 24 apresentam concentrações marcadamente inferiores às dos restantes perfis, enquanto que os perfis de concentração dos degraus 27, 30 e 32 são muito próximos;
- para valores de y inferiores a cerca de 3 cm e idêntica distância à soleira, os perfis de concentração de ar dos degraus 19, 21 e 24 apresentam concentrações de ar próximas e inferiores em relação às dos restantes perfis. Entre os degraus 24 e 27 verifica-se um ligeiro aumento da concentração de ar, enquanto que entre os degraus 27 e 30 observa-se um aumento mais significativo.

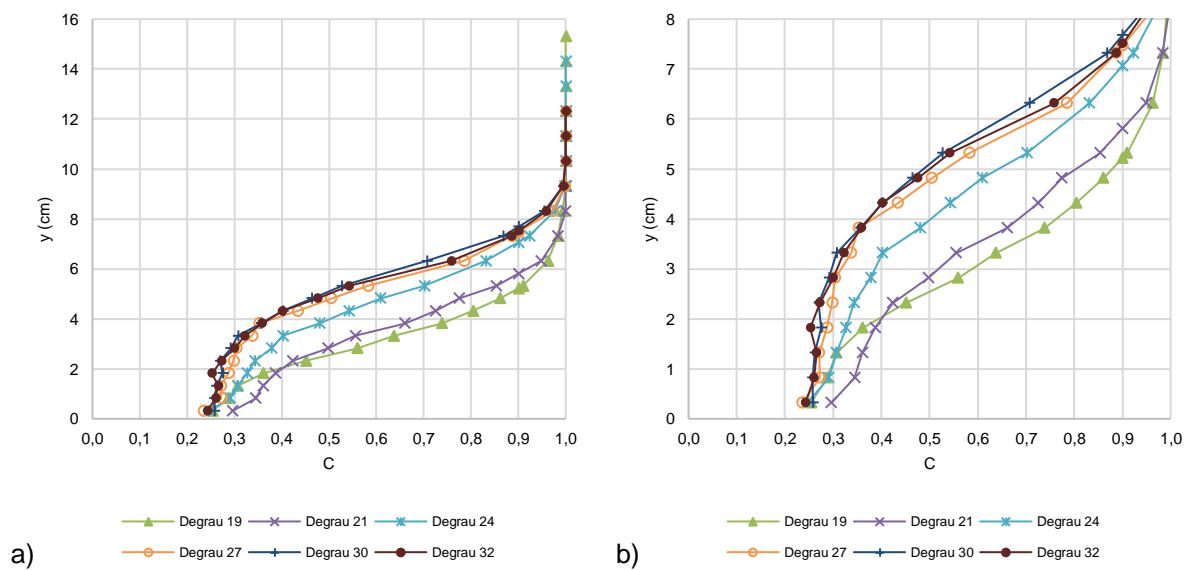


Figura 4.3 – Distribuição da concentração de ar no eixo de simetria da tecla exterior, para $Q=140$ l/s: a) perfil completo; b) região inferior do perfil.

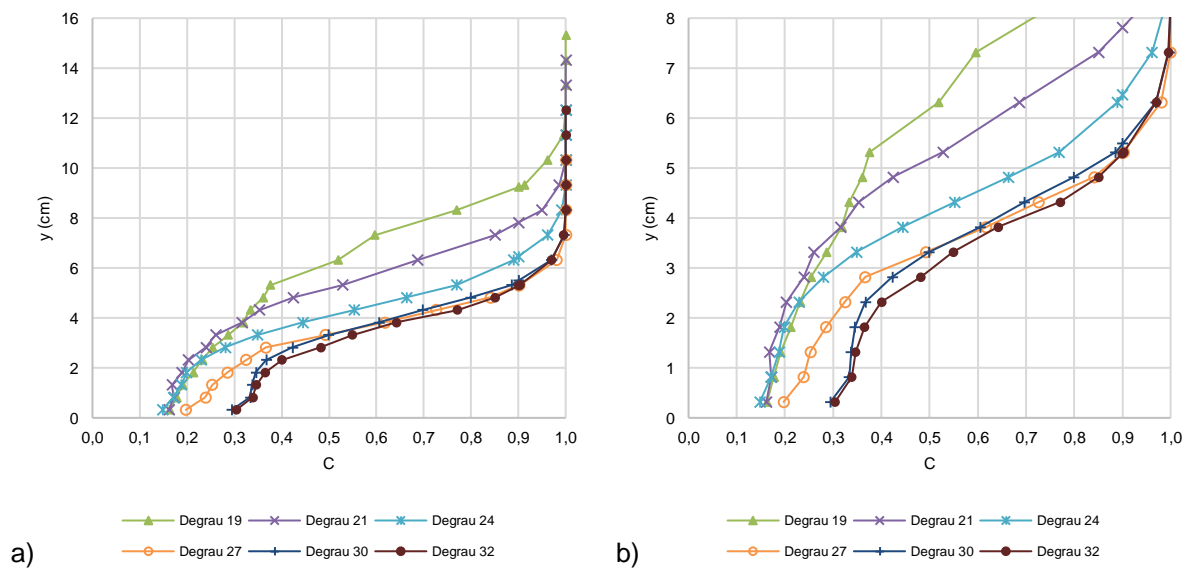


Figura 4.4 – Distribuição da concentração de ar no eixo de simetria da tecla interior, para $Q=140$ l/s: a) perfil completo; b) região inferior do perfil.

Nas Figuras 4.5 a 4.8 apresentam-se os perfis de concentração de ar obtidos no presente estudo e os resultados experimentais obtidos por Reis (2015) na mesma instalação experimental, com degraus de 8 cm de altura. Apresentam-se, para os dois autores, os perfis de concentração de ar (não adimensionais e adimensionalizados) no eixo de simetria da tecla exterior e da tecla interior para os caudais de 80 l/s (Figuras 4.5 e 4.6) e de 140 l/s (Figuras 4.7 e 4.8).

A análise das Figuras 4.5 e 4.6 permite formular as seguintes observações:

- os perfis de concentração de ar (não adimensionais e adimensionalizados) provenientes do eixo de simetria da tecla exterior e da tecla interior apresentam diferenças evidentes ao longo do descarregador;
- nos degraus 15, 17 e 19, os perfis de concentração de ar obtidos no eixo de simetria da tecla exterior apresentam concentrações de ar superiores às obtidas na tecla interior;
- no degrau 21, os perfis de concentração de ar do eixo de simetria da tecla exterior e da tecla interior são praticamente coincidentes, para aproximadamente $y > 3$ cm ou $y/Y_{90} > 0,7$;
- nos degraus 24, 27, 30 e 32, os perfis de concentração de ar obtidos no eixo de simetria da tecla interior apresentam em geral concentrações de ar superiores às obtidas na tecla exterior;
- no degrau 15, os perfis de concentração de ar neste estudo apresentam uma ligeira diferença em relação aos obtidos por Reis (2015), para idêntica distância à soleira, as concentrações de ar obtidas são ligeiramente superiores à obtidas por Reis (2015);
- nos degraus 17 a 32, para a parte superior do escoamento (aproximadamente $y > 3$ cm e $y/Y_{90} > 0,8$), os perfis de concentração de ar obtidos nos eixos de simetria da tecla exterior e interior encontram-se relativamente próximos dos perfis obtidos por Reis (2015);
- nos degraus 17 e 19, para a parte inferior do escoamento (aproximadamente $y < 3$ cm e $y/Y_{90} < 0,8$), os perfis de concentração de ar nos eixos de simetria das teclas interior e exterior são próximos aos perfis obtidos por Reis (2015);
- nos degraus 19 a 32, para a parte inferior do escoamento (aproximadamente $y < 3$ cm e $y/Y_{90} < 0,8$), os perfis de concentração de ar nos eixos de simetria da tecla interior e exterior apresentam um andamento diferente em relação aos valores obtidos por Reis (2015): enquanto a concentração de ar obtida por Reis (2015) aumenta (segundo a normal à soleira) gradualmente de concentrações de ar menores para maiores, os resultados obtidos apresentam maior concentração junto da soleira do que no ponto da vertical imediatamente acima;
- nos degraus 15, 17 e 19, os perfis de concentração obtidos por Reis (2015) apresentam concentrações de ar extremamente elevadas junto à soleira fictícia em relação às concentrações de ar imediatamente acima; este facto resulta da deficiente colocação da extremidade da sonda após aperto do mecanismo de suporte, ficando esta colocada ligeiramente abaixo da soleira fictícia, como referido em Reis (2015).

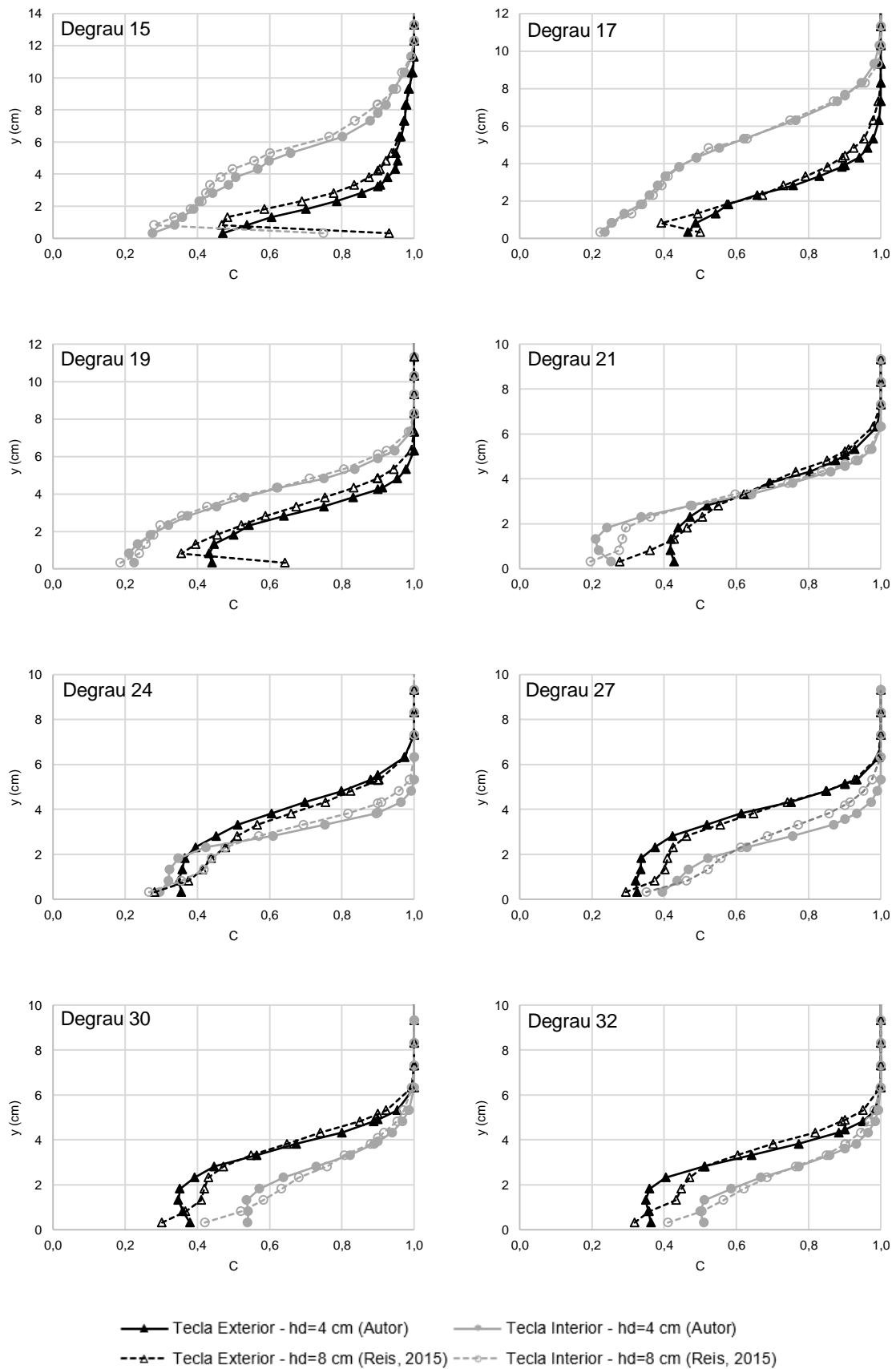


Figura 4.5 – Distribuição da concentração de ar do presente estudo e de Reis (2015), para $Q=80$ l/s.

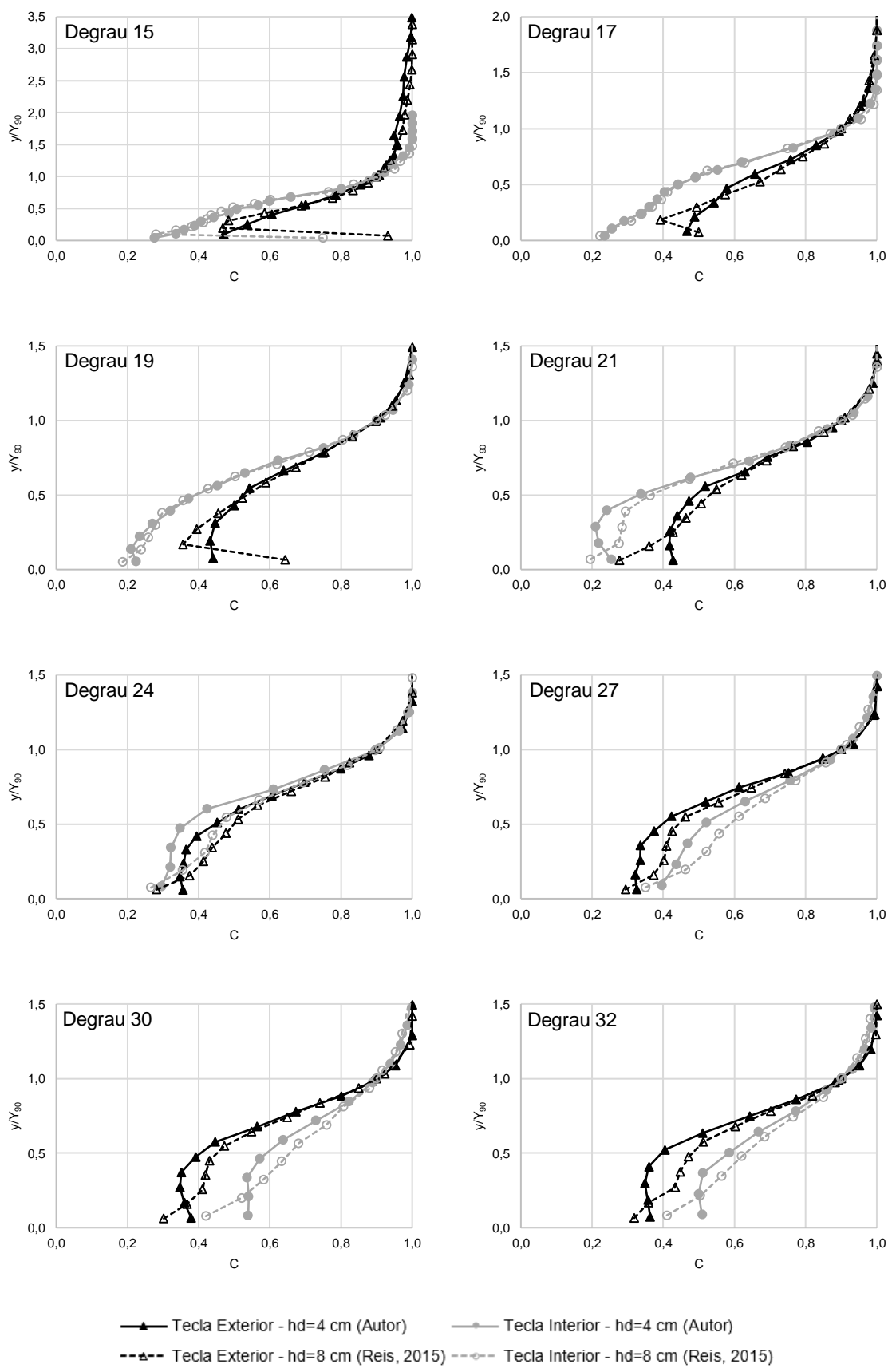


Figura 4.6 – Distribuição adimensional da concentração de ar do presente estudo e de Reis (2015), para $Q=80$ l/s.

Com base na análise das Figuras 4.7 e 4.8, é possível formular as seguintes observações:

- os perfis de concentração de ar (não adimensionais e adimensionalizados) provenientes do eixo de simetria da tecla exterior e da tecla interior apresentam diferenças evidentes ao longo do descarregador;
- nos degraus 19 e 21, os perfis de concentração de ar obtidos no eixo de simetria da tecla exterior apresentam concentrações de ar superiores às obtidas na tecla interior;
- no degrau 24, os perfis de concentração de ar do eixo de simetria da tecla exterior e da tecla interior são praticamente coincidentes, para aproximadamente $y > 4$ cm e $y/Y_{90} > 0,7$;
- nos degraus 27, 30 e 32, os perfis de concentração de ar obtidos no eixo de simetria da tecla interior apresentam em geral concentrações de ar superiores às obtidas na tecla exterior;
- nos degraus 19, 21 e 24, os perfis de concentração de ar obtidos neste estudo nos eixos de simetria das teclas exterior e interior encontram-se relativamente próximos dos valores obtidos por Reis (2015);
- nos degraus 27, 30 e 32, para a parte superior do escoamento (aproximadamente $y > 4$ cm e $y/Y_{90} > 0,7$), os perfis de concentração de ar obtidos nos eixos de simetria das teclas exterior e interior encontram-se relativamente próximos dos valores obtidos por Reis (2015);
- nos degraus 27, 30 e 32, para a parte inferior do escoamento (aproximadamente $y < 4$ cm e $y/Y_{90} < 0,7$), os perfis de concentração de ar nos eixos de simetria das teclas exterior e interior apresentam concentrações de ar inferiores em relação aos perfis de concentração de ar obtidos por Reis (2015).

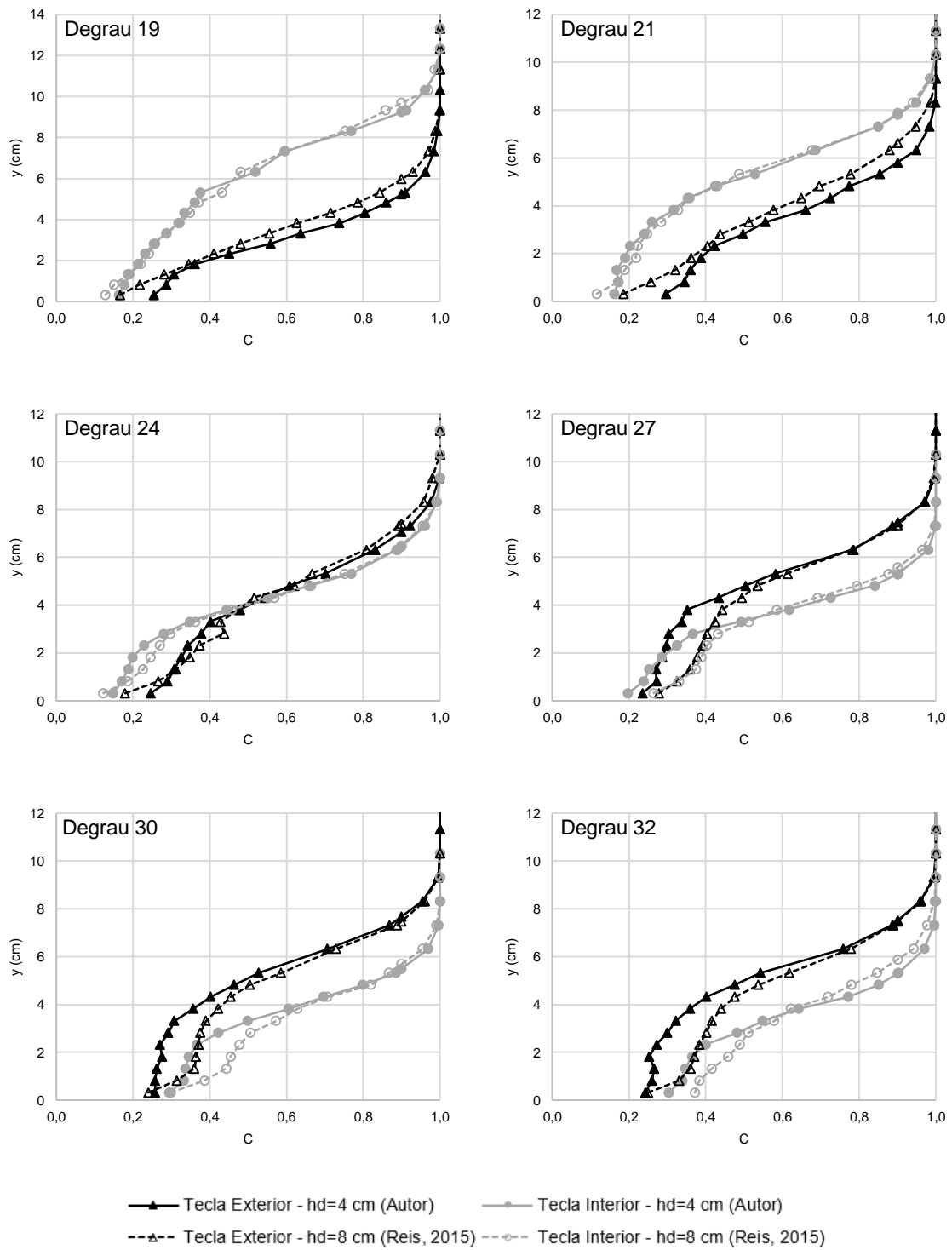


Figura 4.7 – Distribuição da concentração de ar do presente estudo e de Reis (2015), para $Q=140$ l/s.

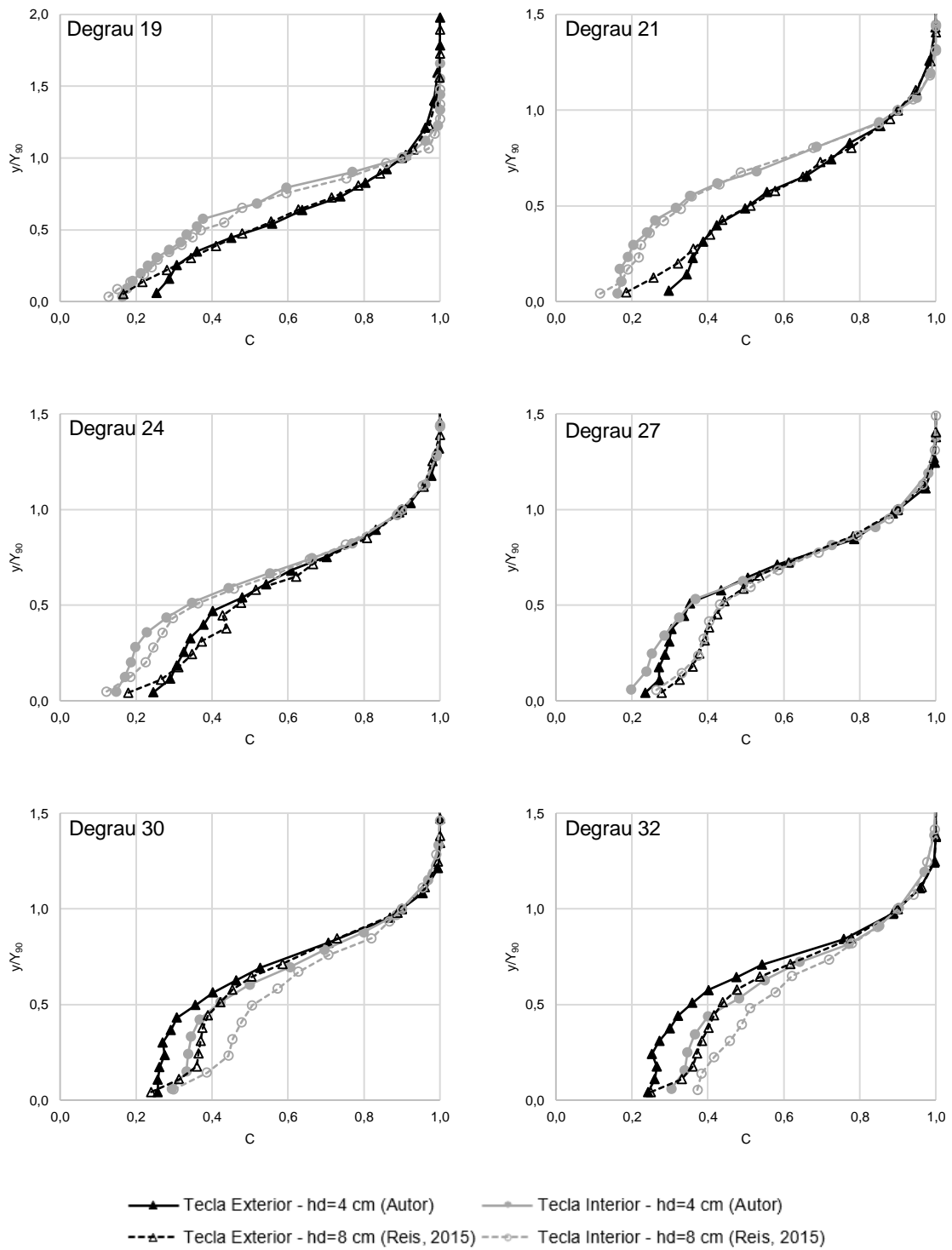


Figura 4.8 – Distribuição adimensional da concentração de ar do presente estudo e de Reis (2015), para $Q=140$ l/s.

Nas Figuras 4.9 a 4.12 apresentam-se os perfis de concentração de ar do presente estudo e os resultados experimentais obtidos por Meireles (2004) na mesma instalação experimental, para a mesma altura dos degraus do descarregador ($h_d=4$ cm) e uma soleira descarregadora do tipo WES. Apresentam-se os perfis de concentração de ar (não adimensionais e adimensionalizados), no eixo de simetria da tecla exterior e da tecla interior (presente estudo) e no eixo do canal descarregador (Meireles, 2004), para os caudais de 80 l/s (Figuras 4.9 e 4.10) e de 140 l/s (Figuras 4.11 e 4.12).

A análise das Figuras 4.9 e 4.10 permite retirar as seguintes conclusões:

- nos degraus 15 e 17, os perfis de concentração de ar (não adimensionais e adimensionalizados) nos eixos de simetria das teclas exterior e interior são claramente distintos dos perfis de concentração obtidos por Meireles (2004), o que é expectável tendo em conta as diferentes condições do escoamento a jusante de soleiras descarregadoras do tipo PKW e do tipo WES;
- nos degraus 19 e 21, os perfis de concentração de ar (não adimensionais e adimensionalizados) obtidos por Meireles (2004) encontram-se em geral compreendidos entre os obtidos para os eixos de simetria das teclas exterior e interior; para a parte inferior do escoamento (aproximadamente $y < 2$ cm e $y/Y_{90} < 0,8$), os perfis de concentração de ar obtidos por Meireles (2004) aproximam-se dos obtidos neste estudo para o eixo de simetria da tecla interior;
- nos degraus 24, 27 e 30, os perfis de concentração de ar (não adimensionais e adimensionalizados) obtidos por Meireles (2004) encontram-se entre os resultados obtidos neste estudo para os eixos de simetria das teclas exterior e interior;
- nos degraus 19, 21, 24, 27 e 30, para a parte inferior do escoamento (aproximadamente $y < 3$ cm e $y/Y_{90} < 0,8$), os perfis de concentração de ar nos eixos de simetria das teclas interior e exterior apresentam em geral maior concentração junto da soleira de fundo do que no ponto da vertical imediatamente acima; Meireles (2004) obteve o mesmo aumento de concentração de ar junto da soleira fictícia nos perfis de concentração dos degraus 19, 21, 24, 27 e 30, tendo procedido à repetição dos ensaios nas verticais em questão e concluído que o aumento de concentração de ar junto da soleira fictícia é provocado por um ligeiro desalinhamento nos degraus de 4 cm de altura que provocam perturbações no escoamento. Os perfis de concentração de ar em que é mais evidente este aumento de concentração de ar junto da soleira são os que correspondem aos caudais menores.

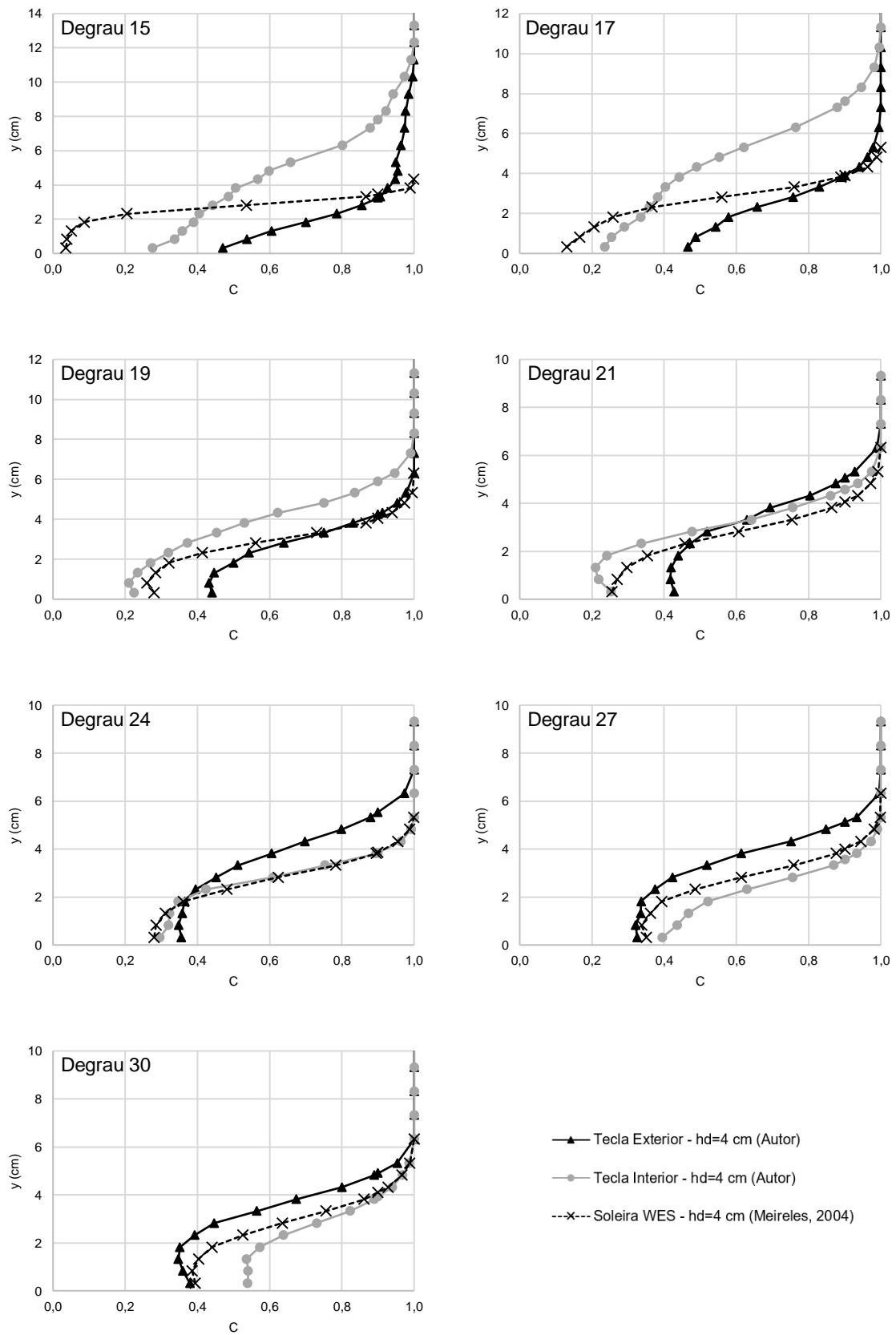


Figura 4.9 – Distribuição da concentração de ar do presente estudo e de Meireles (2004), para $Q=80$ l/s.

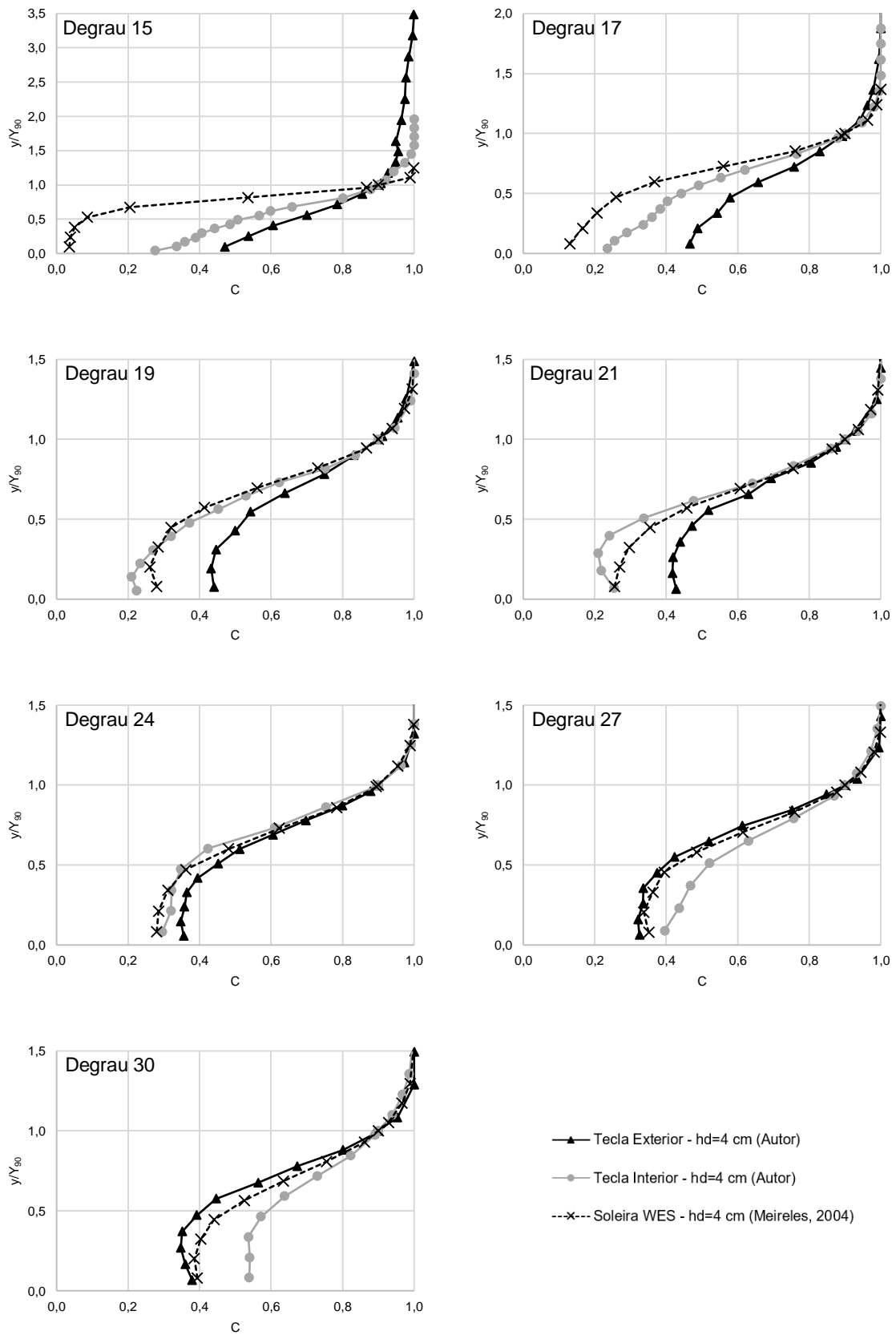


Figura 4.10 – Distribuição adimensional da concentração de ar do presente estudo e de Meireles (2004), para $Q=80$ l/s.

Com base nas Figuras 4.11 e 4.12 formulam-se as seguintes observações:

- nos degraus 19 e 21, os perfis de concentração de ar (não adimensionais e adimensionalizados) nos eixos de simetria das teclas exterior e interior são distintos dos perfis de concentração obtidos por Meireles (2004); o que é expectável tendo em conta as diferentes condições do escoamento a jusante de soleiras descarregadoras do tipo PKW e do tipo WES;
- nos degraus 24, 27 e 30, os perfis de concentração de ar obtidos por Meireles (2004) são praticamente coincidentes com os obtidos para o eixo de simetria da tecla interior;
- nos degraus 27 e 30, os perfis de concentração de ar (adimensionalizados) obtidos por Meireles (2004) são muito próximos dos obtidos neste estudo, nos eixos de simetrias das teclas exterior e interior.

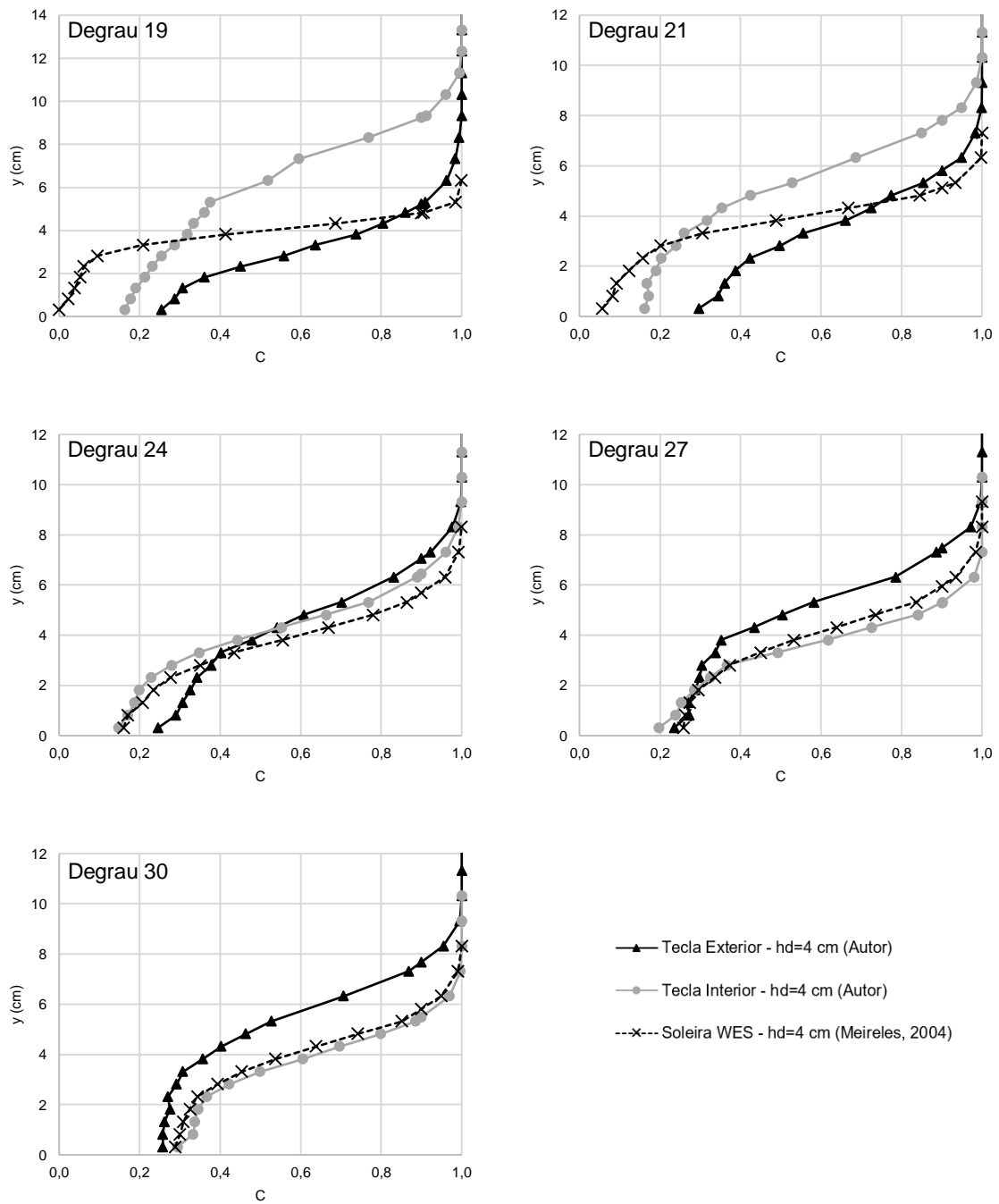


Figura 4.11 – Distribuição da concentração de ar do presente estudo e de Meireles (2004), para $Q=140$ l/s.

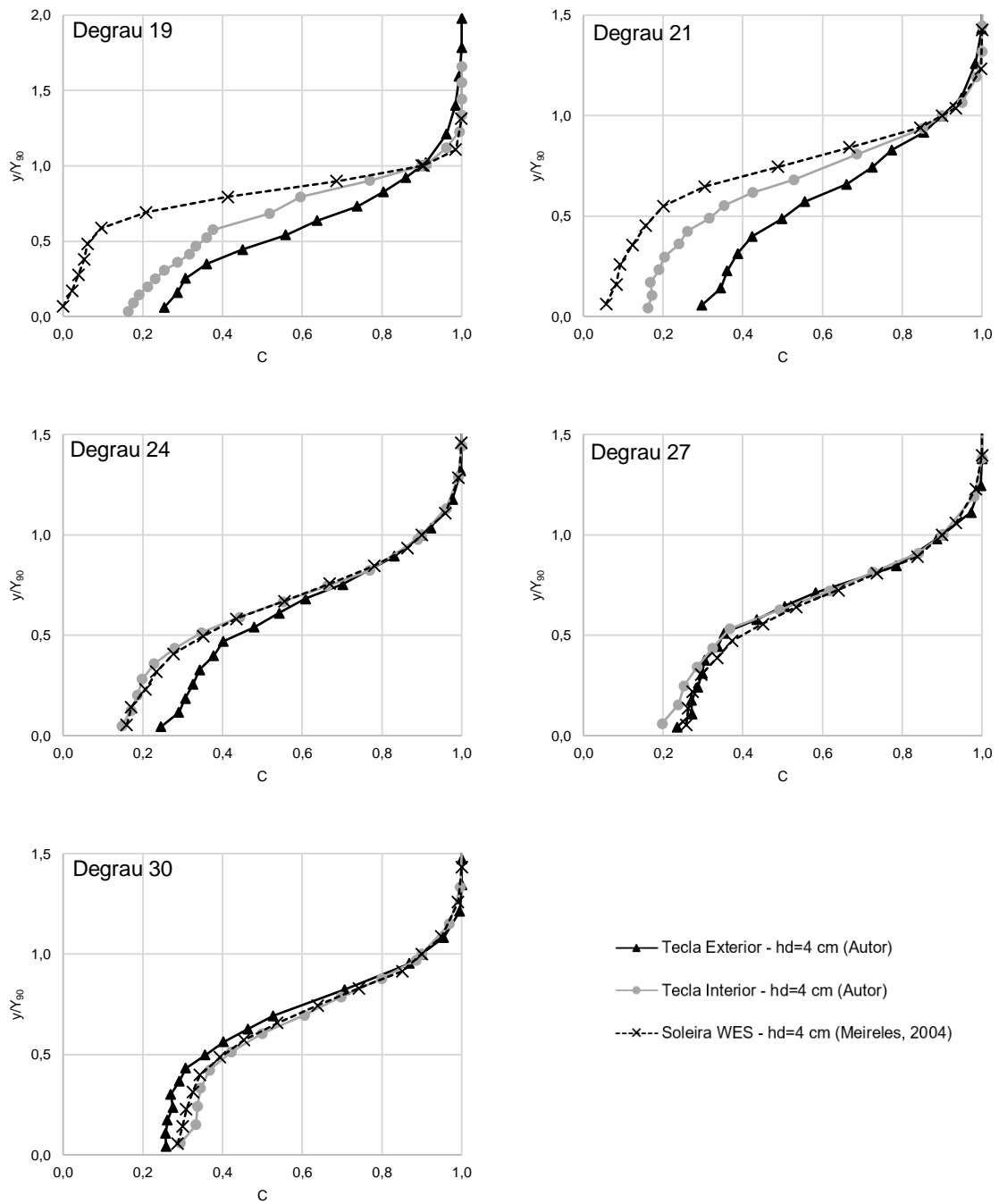


Figura 4.12 – Distribuição adimensional da concentração de ar do presente estudo e de Meireles (2004), para $Q=140$ l/s.

4.2.3. Evolução da concentração média de ar

Nas Figuras 4.13 e 4.14 apresentam-se as concentrações médias de ar (\bar{C}) ao longo do canal descarregador nos eixos de simetria das teclas exterior e interior para os caudais de 80 l/s e de 140 l/s.

Na Figura 4.13 apresentam-se os resultados do presente estudo, conjuntamente com os resultados obtidos por Reis (2015) para um descarregador com degraus de 8 cm de altura. A análise da Figura 4.13 permite formular as seguintes observações:

- os valores de concentração média de ar ao longo do descarregador, para o caudal de 80 l/s, são sempre superiores aos valores obtidos para o caudal de 140 l/s;
- o andamento geral da concentração média de ar não se altera significativamente com o caudal, embora se modifique consideravelmente se for proveniente do eixo de simetria da tecla exterior ou interior;
- no eixo de simetria da tecla exterior, para ambos os caudais, a concentração média de ar diminui em geral ao longo do descarregador até atingir um valor aproximadamente constante.
- no eixo de simetria da tecla interior, para o caudal de 80 l/s, ocorre uma diminuição da concentração média de ar no trecho inicial do descarregador até o degrau 21, a jusante do qual se observa um aumento significativo da concentração média de ar até se atingir o degrau 30;
- os valores de concentração média de ar obtidos por Reis (2015), para os caudais de 80 l/s e 140 l/s, apresentam o mesmo andamento dos obtidos no presente estudo. Nos primeiros três degraus (por ambos os caudais) as concentrações médias de ar são idênticas, uma vez que o escoamento proveniente da soleira descarregadora é determinante nos valores iniciais de concentração de ar. A jusante dos primeiros três degraus a concentração média de ar obtida por Reis (2015) aumenta gradualmente em relação à obtida neste estudo nos eixos de simetria das teclas exterior e interior.

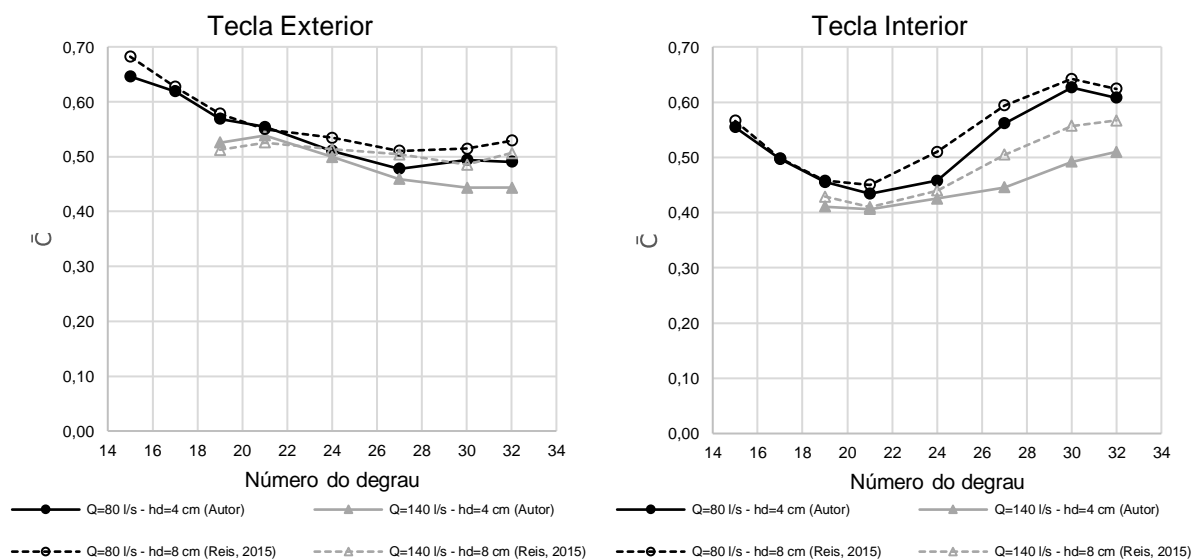


Figura 4.13 – Concentrações médias de ar nos eixos de simetria das teclas exterior e interior do presente estudo e de Reis (2015), na mesma instalação experimental com altura de degraus de 8 cm e soleira descarregadora do tipo PKW.

Na Figura 4.14, para além dos resultados do presente trabalho, também se apresentam os valores obtidos por Meireles (2004) e Matos (1999) no mesmo descarregador, com degraus de 4 e 8 cm de altura, respetivamente, precedido de uma soleira descarregadora do tipo WES. A análise da Figura 4.14 permite formular as seguintes observações:

- inicialmente, os valores de concentração média de ar no eixo de simetria da tecla exterior são superiores aos do eixo de simetria da tecla interior; reduzindo gradualmente, até que a jusante dos degraus 24 e 27, para os caudais de 80 l/s e de 140 l/s respetivamente, inverte-se a tendência e a tecla interior apresenta valores de concentração média de ar superiores. Como referido em Reis (2015), tal resulta do efeito da tridimensionalidade do escoamento e das ondas estacionárias oblíquas que ocorrem ao longo do canal;
- no eixo de simetria da tecla exterior, a concentração média de ar diminui em geral ao longo do descarregador para ambos os caudais; contrariamente ao obtido por Meireles (2004) e Matos (1999), para uma soleira descarregadora do tipo WES, em que se observou um aumento da concentração do ar ao longo do descarregador. Como referido em Reis (2015), a intersecção dos jatos de água provenientes das superfícies laterais da tecla interior com o escoamento frontal da tecla exterior e a elevada turbulência resultante, explica as elevadas concentrações de ar observadas imediatamente a jusante da tecla exterior;
- para o caudal de 80 l/s, a jusante do degrau 19, as concentrações médias de ar obtidas por Meireles (2004) e Matos (1999) estão em geral compreendidas entre as concentrações médias de ar obtidas no presente estudo para os eixos de simetria das teclas exterior e interior, no final do descarregador, os valores de Meireles (2004) aproximam-se dos obtidos neste estudo no eixo de simetria da tecla exterior;
- para o caudal de 140 l/s, a jusante do degrau 24, as concentrações médias de ar obtidas por Meireles (2004) e Matos (1999) estão em geral compreendidas entre as concentrações médias de ar obtidas no presente estudo.

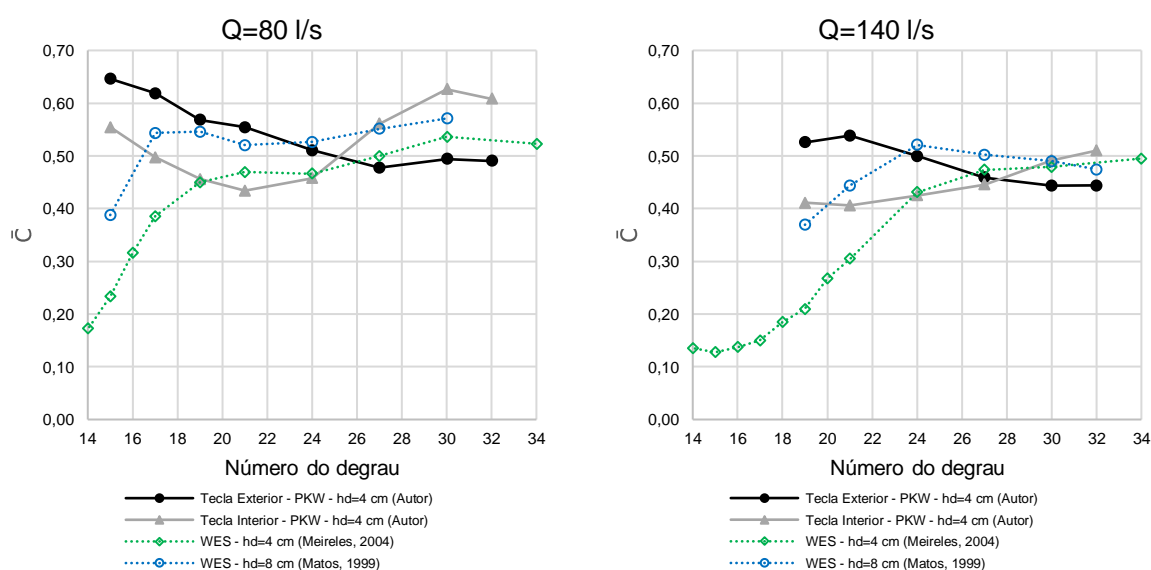


Figura 4.14 – Concentrações médias de ar ao longo do descarregador do presente estudo e de Meireles (2004) e Matos (1999), na mesma instalação experimental com altura de degraus de 4 e 8 cm, respetivamente, e soleira descarregadora do tipo WES.

4.2.4. Evolução das alturas representativas do escoamento

Nas Figuras 4.15 a 4.18 apresenta-se a altura equivalente de água (h) e a altura característica do escoamento (Y_{90}) no eixo de simetria das teclas exterior e interior, para os caudais de 80 l/s e de 140 l/s. Para além dos resultados obtidos, apresentam-se os obtidos por Reis (2015), para um descarregador com degraus de 8 cm de altura, e os obtidos por Meireles (2004), para um descarregador com degraus de 4 cm de altura precedido de uma soleira descarregadora do tipo WES.

Com base na análise das Figuras 4.15 a 4.18, formulam-se as seguintes observações:

- para ambos os caudais, os valores de h e Y_{90} no eixo de simetria da tecla interior são inicialmente superiores aos do eixo de simetria da tecla exterior, invertendo-se a situação a jusante do degrau 21 e do degrau 24, para os caudais de 80 l/s e 140 l/s, respetivamente;
- para ambos os caudais, os valores de h e Y_{90} obtidos por Reis (2015) são praticamente idênticos aos obtidos neste estudo. Nos primeiros degraus (degraus 15 a 19, para o caudal de 80 l/s, e degraus 19 e 21, para o caudal de 140 l/s) os valores obtidos por Reis (2015) para a tecla exterior são ligeiramente superiores aos obtidos neste estudo;
- para o caudal de 80 l/s, os valores de h obtidos por Meireles (2004) estão compreendidos entre os valores obtidos para as teclas exterior e interior ao longo do descarregador, enquanto que os valores de Y_{90} se aproximam dos obtidos para a tecla interior, a jusante do degrau 21;
- para o caudal de 140 l/s, os valores de h e Y_{90} obtidos por Meireles (2004), a jusante do degrau 24, estão muito próximos dos obtidos no presente estudo para a tecla interior.

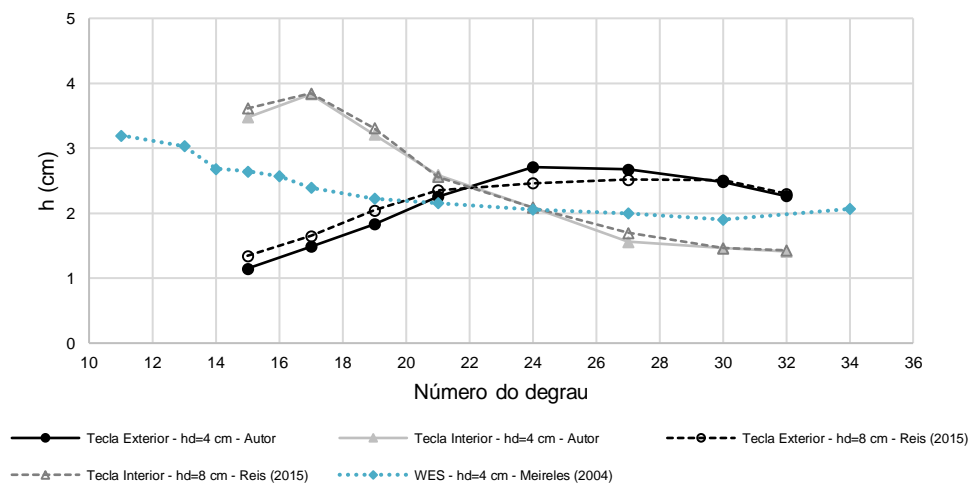


Figura 4.15 – Altura equivalente de água ao longo do descarregador em degraus, nos eixos de simetria das teclas exterior e interior, para $Q=80$ l/s; comparação com os resultados obtidos por Reis (2015) e por Meireles (2004).

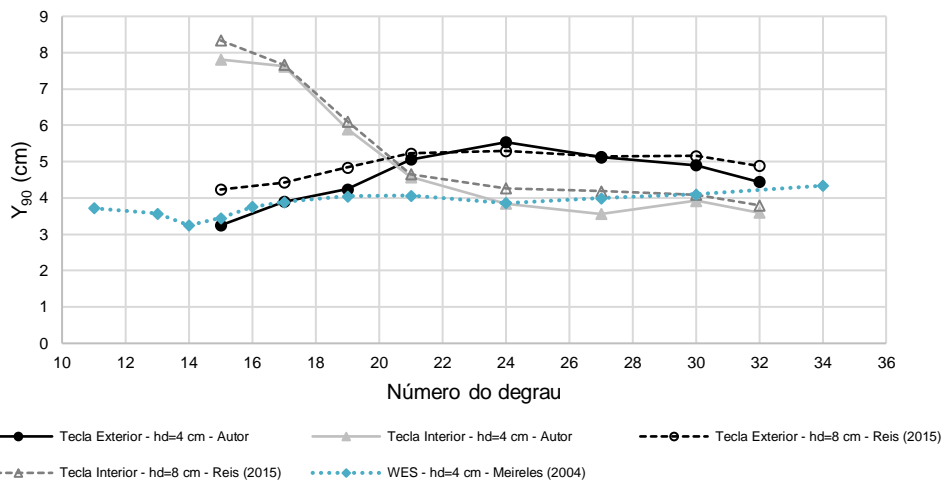


Figura 4.16 – Altura característica do escoamento ao longo do descarregador em degraus, nos eixos de simetria das teclas exterior e interior, para $Q=80$ l/s; comparação com os resultados obtidos por Reis (2015) e por Meireles (2004).

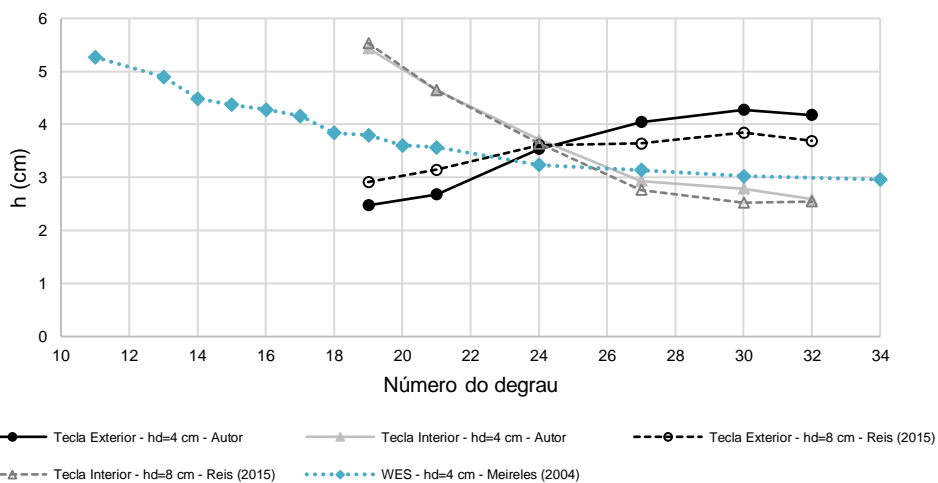


Figura 4.17 – Altura equivalente de água ao longo do descarregador em degraus, nos eixos de simetria das teclas exterior e interior, para $Q=140$ l/s; comparação com os resultados obtidos por Reis (2015) e por Meireles (2004).

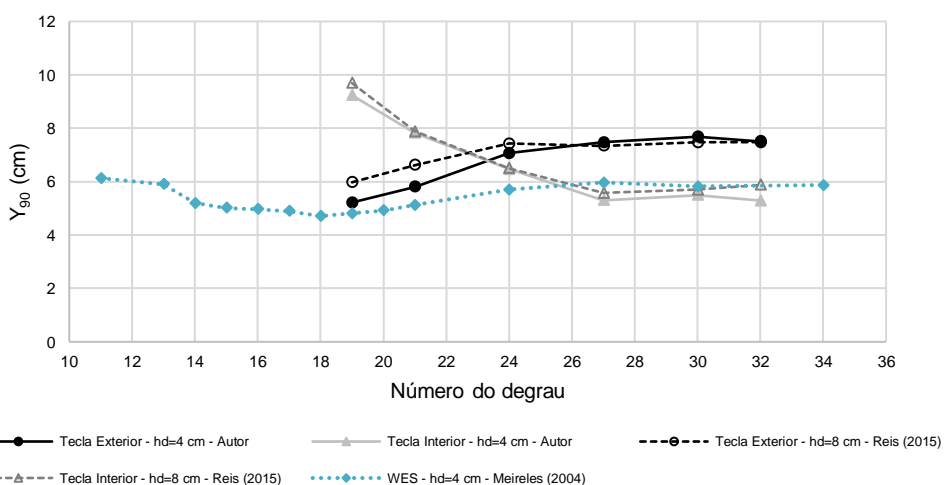


Figura 4.18 – Altura característica do escoamento ao longo do descarregador em degraus, nos eixos de simetria das teclas exterior e interior, para $Q=140$ l/s; comparação com os resultados obtidos por Reis (2015) e por Meireles (2004).

4.3. Ressalto hidráulico na bacia de dissipação de energia

4.3.1. Considerações prévias

Os ensaios experimentais foram desenvolvidos na mesma instalação experimental de outros estudos (Matos, 1999, Meireles, 2004, Cardoso, 2007, Reis, 2015 e Pinto, 2017) e permitiram identificar, através de observação do ressalto hidráulico, a formação de três trechos distintos na mudança de concavidade das linhas de corrente do escoamento na bacia de dissipação de energia (Figura 4.19):

- trecho I, em que a mudança brusca do declive entre o descarregador de degraus e a bacia de dissipação provoca uma mudança na direção do escoamento, que resulta na concavidade das linhas de corrente;
- trecho II, em que o escoamento proveniente do trecho I se afasta do fundo da bacia de dissipação, dando origem à convexidade das linhas de corrente nesse trecho;
- trecho III, em que o escoamento volta a aproximar-se do fundo da bacia de dissipação, conduzindo à concavidade das linhas de corrente.

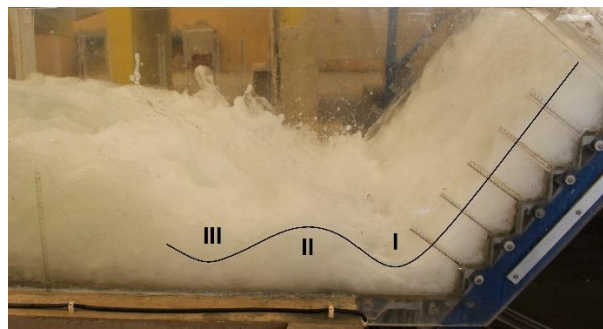


Figura 4.19 – Linhas de corrente do escoamento no início do ressalto hidráulico.

Através da regulação da abertura da comporta a jusante é possível ajustar a posição do ressalto hidráulico. No estudo desenvolvido por Pinto (2017) foram avaliadas três posições do ressalto hidráulico para a bacia de dissipação sem acessórios e quatro posições do ressalto hidráulico para a bacia de dissipação com acessórios (para um descarregador com degraus de 8 cm de altura):

- posição 1, início do ressalto hidráulico no penúltimo degrau do descarregador em degraus;
- posição 2, início do ressalto hidráulico no último degrau do descarregador em degraus;
- posição 3, início do ressalto hidráulico na secção contraída do escoamento;
- posição 4, início do ressalto hidráulico na secção correspondente à face a montante dos blocos de impacto de uma bacia de dissipação de energia do tipo III da USBR (apenas para o caso da bacia de dissipação com acessórios).

No presente estudo apenas se considerou o caso de uma bacia de dissipação de energia sem acessórios, tendo-se efetuado ensaios para a posição 1, 2 e 3 do início do ressalto hidráulico (Figura 4.20). A posição 1 é definida pelo início do ressalto hidráulico no quarto degrau a contar do fim, enquanto que a posição 2 é definida pelo início do ressalto hidráulico no penúltimo degrau. A posição 3 é idêntica à descrita por Pinto (2017).

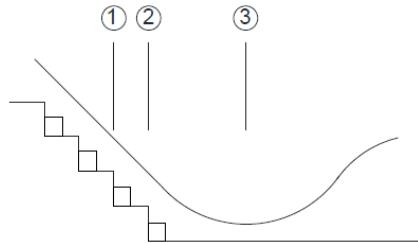


Figura 4.20 – Localização do início do ressalto hidráulico, para as posições 1,2 e 3; Representação esquemática (adaptado de Pinto, 2017).

4.3.2. Alturas piezométricas no trecho inicial

4.3.2.1. Alturas piezométricas máximas e mínimas

Nas Figuras 4.22 a 4.27 apresentam-se as alturas piezométricas máximas e mínimas nas tomadas de pressão localizadas transversalmente ao escoamento e analisam-se os resultados de três alinhamentos de tomadas de pressão (1ª linha, 3ª linha e 6ª linha, ver Figura 3.11) e três posições do início do ressalto hidráulico na bacia de dissipação. De acordo com Pinto (2017), analisou-se a distribuição de pressão nos três alinhamentos (ver Figura 3.11) com o objetivo de avaliar se o escoamento seria bidimensional à entrada da bacia.

Nas restantes figuras, a grandeza L representa a distância das tomadas à parede esquerda do canal e a grandeza s representa a distância longitudinal ao início da bacia de dissipação.

As Figuras 4.22, 4.23 e 4.24 apresentam os resultados obtidos para o caudal de 80 l/s e as Figuras 4.25, 4.26 e 4.27 para o caudal de 180 l/s.

Por forma a facilitar a visualização do alinhamento das teclas interior e exterior no escoamento a jusante, na bacia de dissipação, inclui-se nas Figuras 4.22 a 4.33 o esquema da planta da soleira descarregadora, de acordo com a representação esquemática da Figura 4.21.

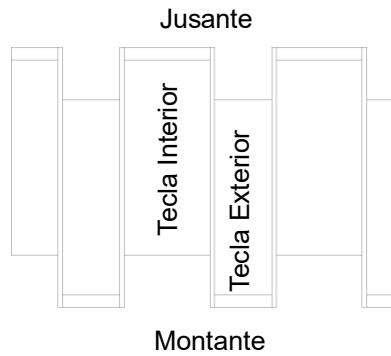


Figura 4.21 – Planta da soleira descarregadora do tipo PKW.

Com base na análise das Figuras 4.22 a 4.27, formulam-se as seguintes conclusões:

- para a mesma posição do ressalto e o mesmo alinhamento, as alturas piezométricas aumentam com o caudal;
- para o caudal de 80 l/s, as alturas piezométricas aumentam consideravelmente com o grau de afogamento do ressalto (da posição 3 para a posição 1). Para o caudal de 180 l/s também se observa um aumento das alturas piezométricas com o grau de afogamento, sendo este aumento relativamente menor em relação à situação observada com o caudal de 80 l/s;
- para o caudal de 80 l/s, a distribuição das alturas piezométricas na 1ª linha é praticamente uniforme, enquanto que, para o caudal de 180 l/s, ocorre um ligeiro aumento no eixo de simetria de uma das teclas exteriores; estes resultados sugerem, em geral, um escoamento praticamente bidimensional no pé do descarregador;
- para ambos os caudais, o valor máximo da altura piezométrica na 3ª linha situa-se entre a tecla exterior e interior do lado direito do descarregador; contrariamente ao observado na 3ª linha, as alturas piezométricas na 6ª linha são mínimas entre a tecla exterior e interior do lado direito do descarregador;
- para o caudal de 80 l/s, os valores mais elevados da altura piezométrica no trecho inicial da bacia de dissipação encontram-se próximos da 2ª linha de tomadas de pressão ($s=0,09$ m), enquanto que para o caudal de 180 l/s encontram-se próximos da 3ª linha ($s=0,12$ m). Com base nestes resultados constata-se que ocorre um ligeiro deslocamento da secção contraída do escoamento para jusante do ressalto hidráulico com o aumento de caudal, analogamente ao observado por Matos (1999) e Meireles (2004).

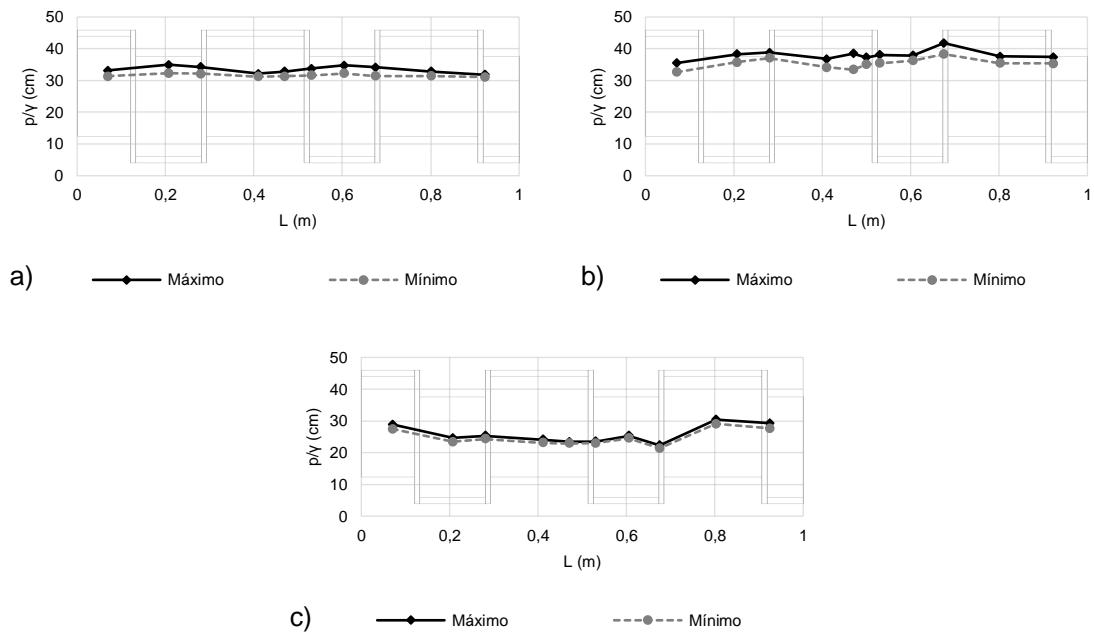


Figura 4.22 – Altura piezométricas máximas e mínimas na secção inicial da bacia de dissipação de energia, com início do ressalto hidráulico na posição 1 para $Q=80$ l/s; a) 1ª linha ($s=0,06$ m); b) 3ª linha ($s=0,12$ m); c) 6ª linha ($s=0,21$ m).

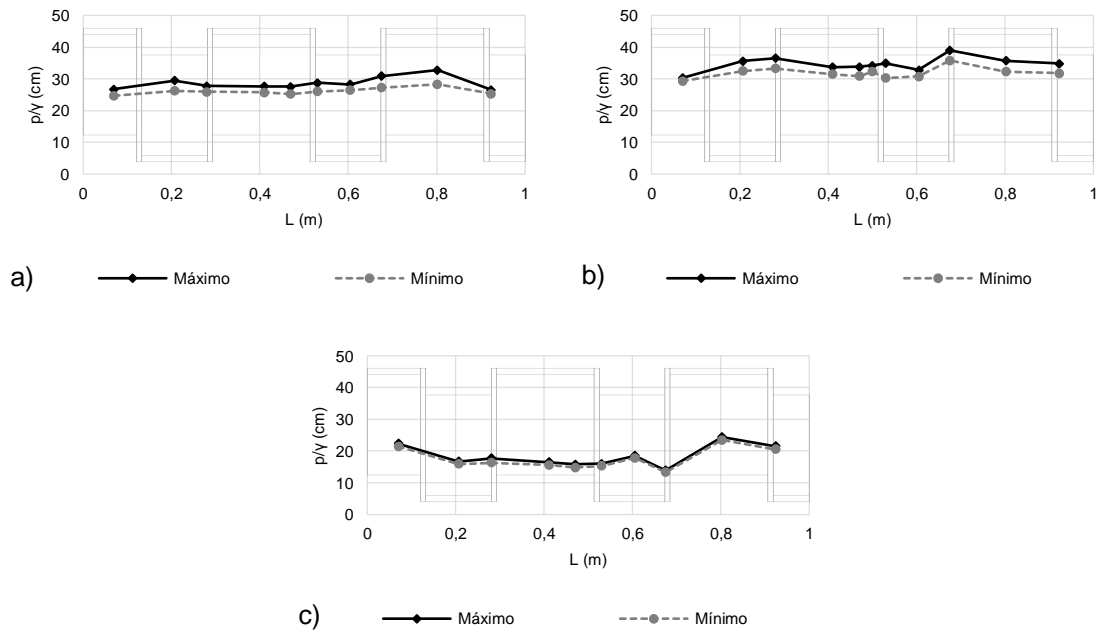


Figura 4.23 – Altura piezométricas máximas e mínimas na secção inicial da bacia de dissipação de energia, com início do ressalto hidráulico na posição 2 para $Q=80$ l/s; a) 1ª linha ($s=0,06$ m); b) 3ª linha ($s=0,12$ m); c) 6ª linha ($s=0,21$ m).

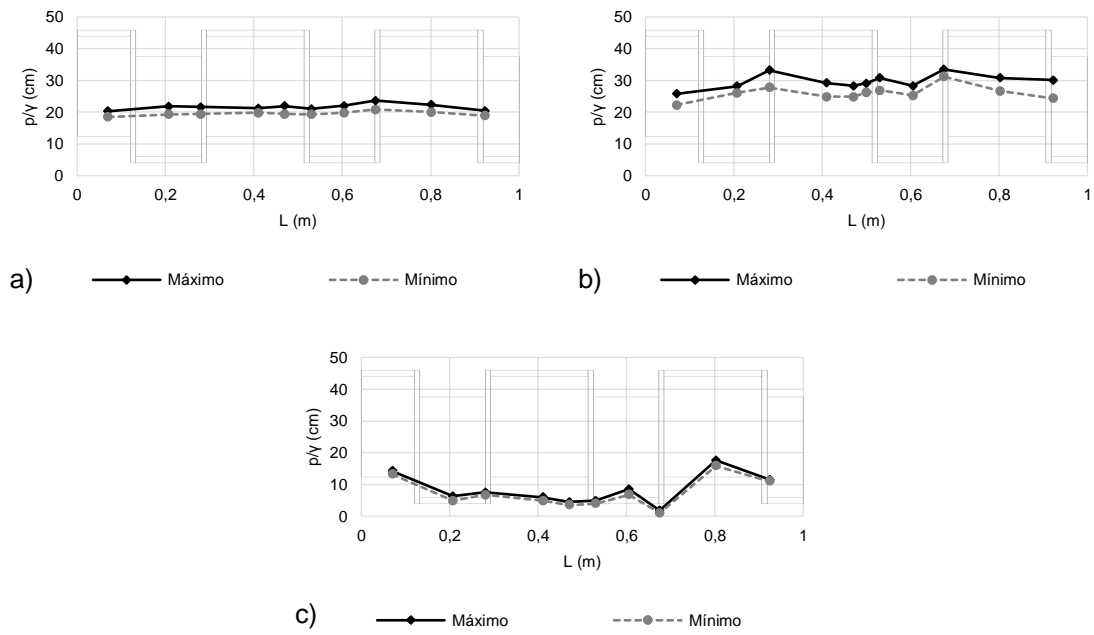


Figura 4.24 – Altura piezométricas máximas e mínimas na secção inicial da bacia de dissipação de energia, com início do ressalto hidráulico na posição 3 para $Q=80$ l/s; a) 1ª linha ($s=0,06$ m); b) 3ª linha ($s=0,12$ m); c) 6ª linha ($s=0,21$ m).

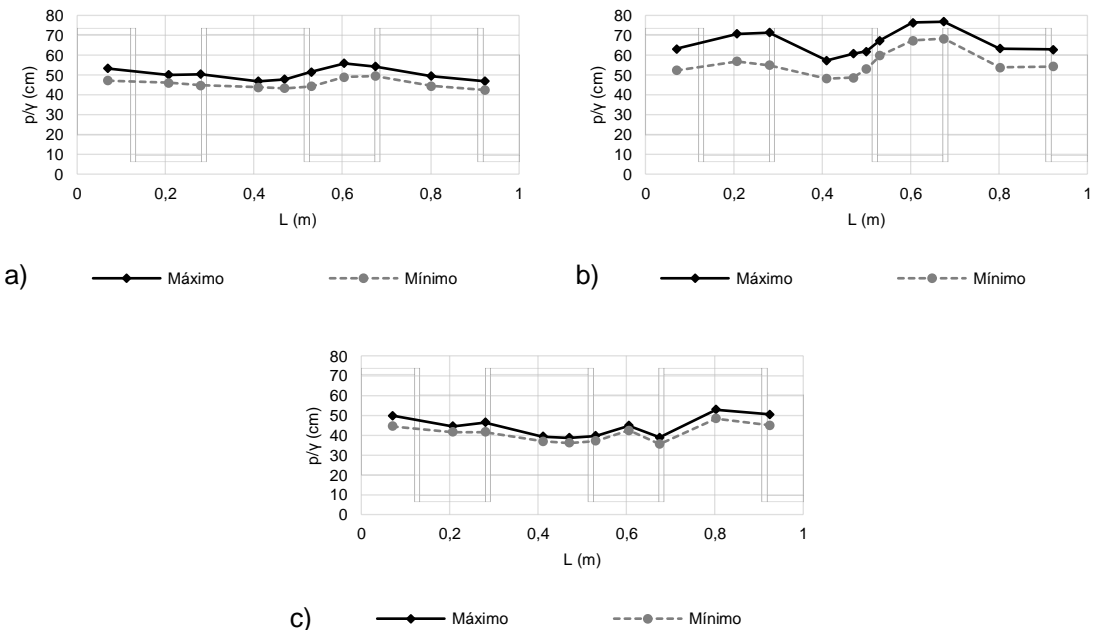


Figura 4.25 – Altura piezométricas máximas e mínimas na secção inicial da bacia de dissipação de energia, com início do ressalto hidráulico na posição 1 para $Q=180$ l/s; a) 1ª linha ($s=0,06$ m); b) 3ª linha ($s=0,12$ m); c) 6ª linha ($s=0,21$ m).

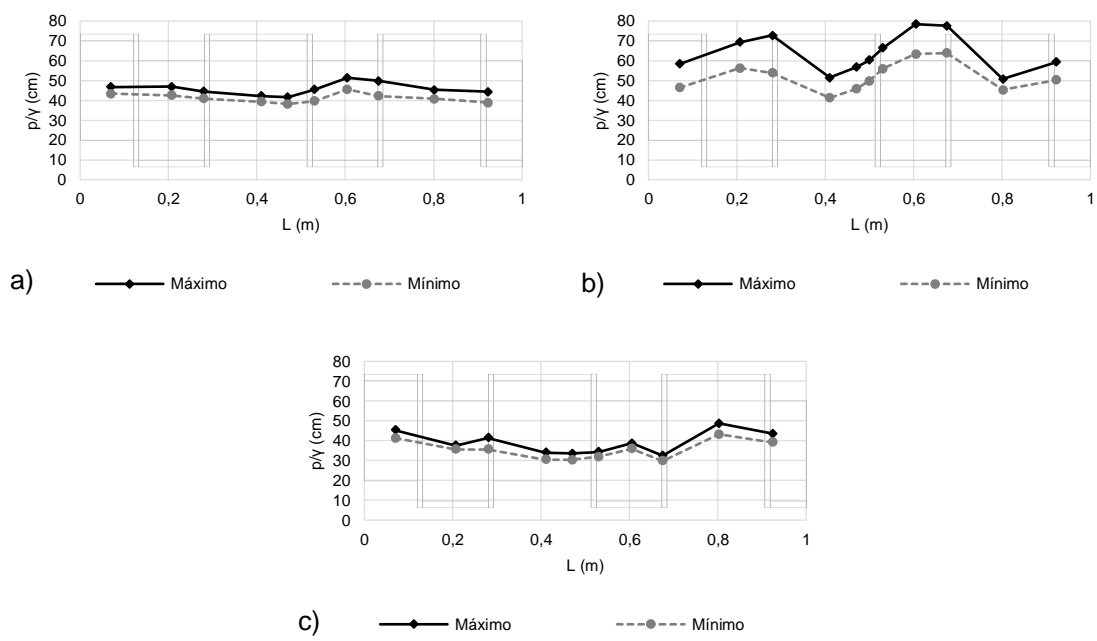


Figura 4.26 – Altura piezométricas máximas e mínimas na secção inicial da bacia de dissipação de energia, com início do ressalto hidráulico na posição 2 para $Q=180$ l/s; a) 1ª linha ($s=0,06$ m); (b) 3ª linha ($s=0,12$ m); (c) 6ª linha ($s=0,21$ m).

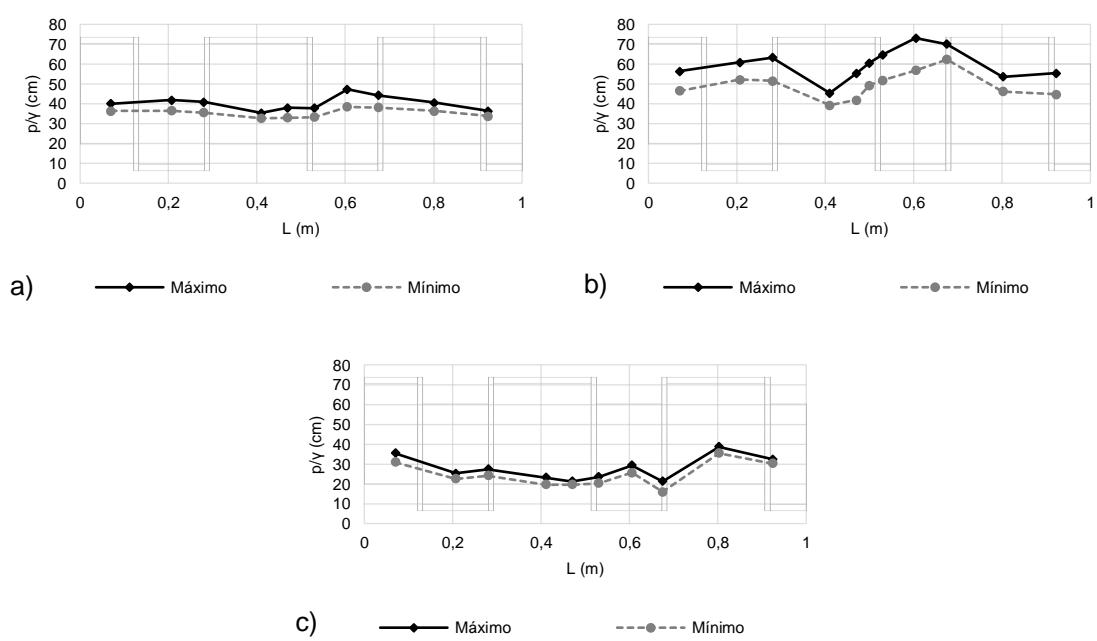


Figura 4.27 – Altura piezométricas máximas e mínimas na secção inicial da bacia de dissipação de energia, com início do ressalto hidráulico na posição 3 para $Q=180$ l/s; a) 1ª linha ($s=0,06$ m); (b) 3ª linha ($s=0,12$ m); (c) 6ª linha ($s=0,21$ m).

4.3.2.2. Alturas piezométricas médias

Nas Figuras 4.28 a 4.33 apresentam-se as alturas piezométricas médias obtidas na 1ª linha, 3ª linha e 6ª linha das tomadas de pressão para a posição 3 do ressalto hidráulico (ver Figura 3.11). Apresentam-se os resultados obtidos no presente estudo para degraus de 4 e de 8 cm de altura.

A análise das Figuras 4.28 a 4.33 permite formular as seguintes observações:

- para a totalidade dos caudais, as alturas piezométricas obtidas com degraus de 4 e de 8 cm de altura são em geral bastante próximas e apresentam distribuições idênticas;
- com o aumento do caudal, a distribuição de alturas piezométricas na 1ª linha mantém-se praticamente uniforme, sendo razoável esperar que o escoamento tenha um comportamento quase bidimensional no pé do descarregador;
- com o aumento do caudal, a distribuição de alturas piezométricas na 3ª linha apresenta uma distribuição mais irregular, nomeadamente com o aumento de altura piezométrica entre a tecla exterior e interior ($L \approx 0,7$ m);
- para a 6ª linha verifica-se uma distribuição de alturas piezométricas irregular, com valores mínimos da altura piezométrica localizados entre as teclas exterior e interior, para $L \approx 0,7$ m.

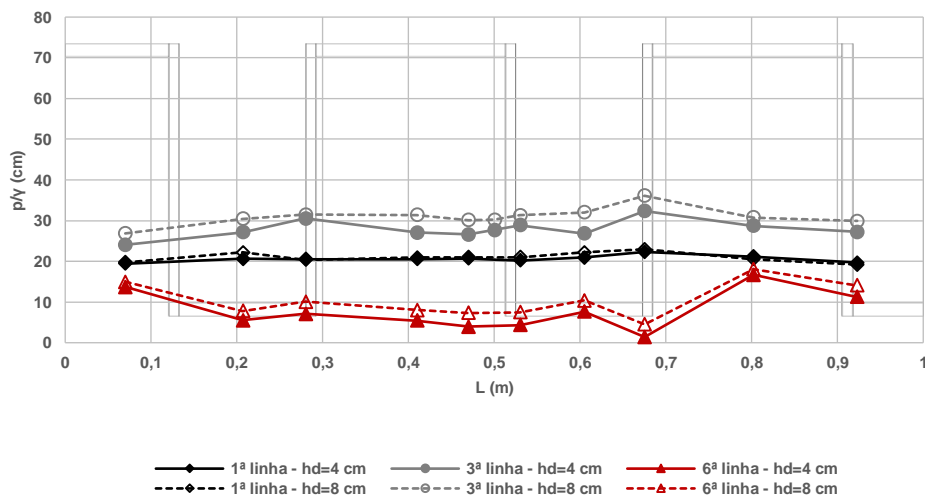


Figura 4.28 – Alturas piezométricas médias na secção inicial da bacia de dissipação de energia, para a posição 3 do ressalto hidráulico. Resultados obtidos com degraus de 4 e 8 cm de altura, para $Q=80$ l/s.

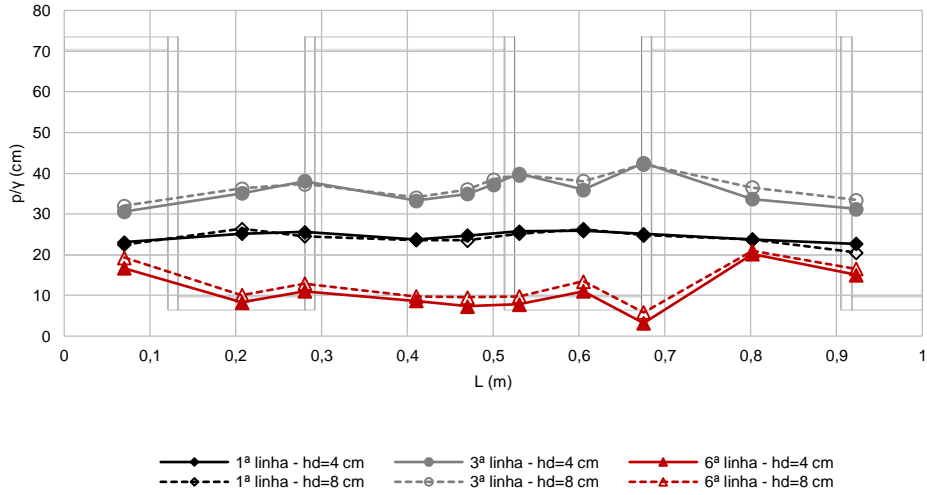


Figura 4.29 – Alturas piezométricas médias na secção inicial da bacia de dissipação de energia, para a posição 3 do ressalto hidráulico. Resultados obtidos com degraus de 4 e 8 cm de altura, para $Q=100$ l/s.

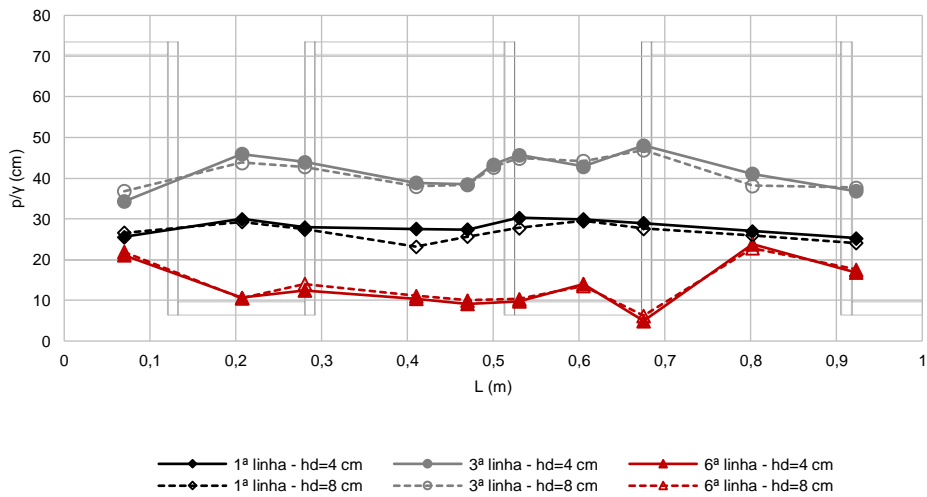


Figura 4.30 – Alturas piezométricas médias na secção inicial da bacia de dissipação de energia, para a posição 3 do ressalto hidráulico. Resultados obtidos com degraus de 4 e 8 cm de altura, para $Q=120$ l/s.

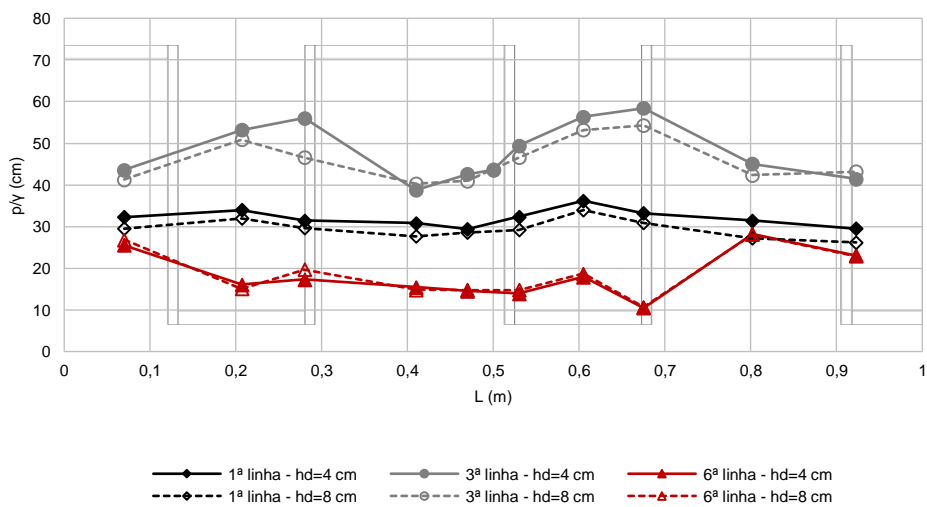


Figura 4.31 – Alturas piezométricas médias na secção inicial da bacia de dissipação de energia, para a posição 3 do ressalto hidráulico. Resultados obtidos com degraus de 4 e 8 cm de altura, para $Q=140$ l/s.

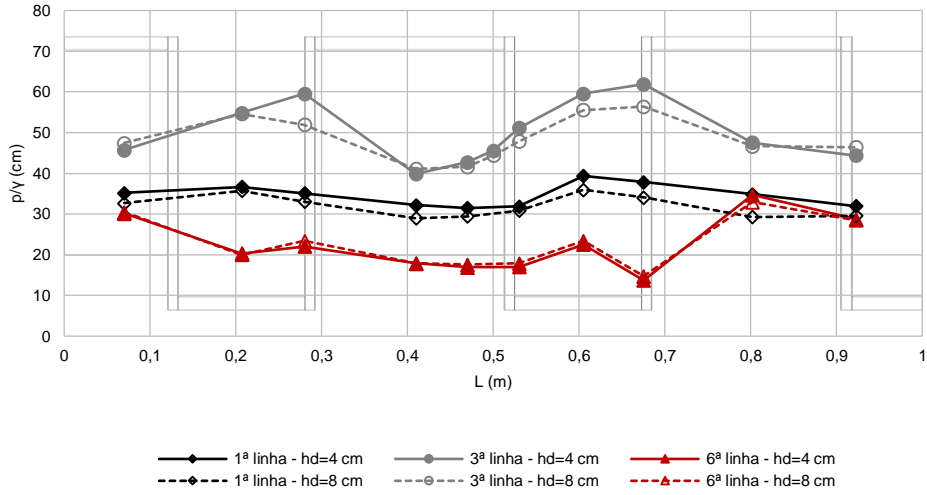


Figura 4.32 – Alturas piezométricas médias na secção inicial da bacia de dissipação de energia, para a posição 3 do ressalto hidráulico. Resultados obtidos com degraus de 4 e 8 cm de altura, para $Q=160$ l/s.

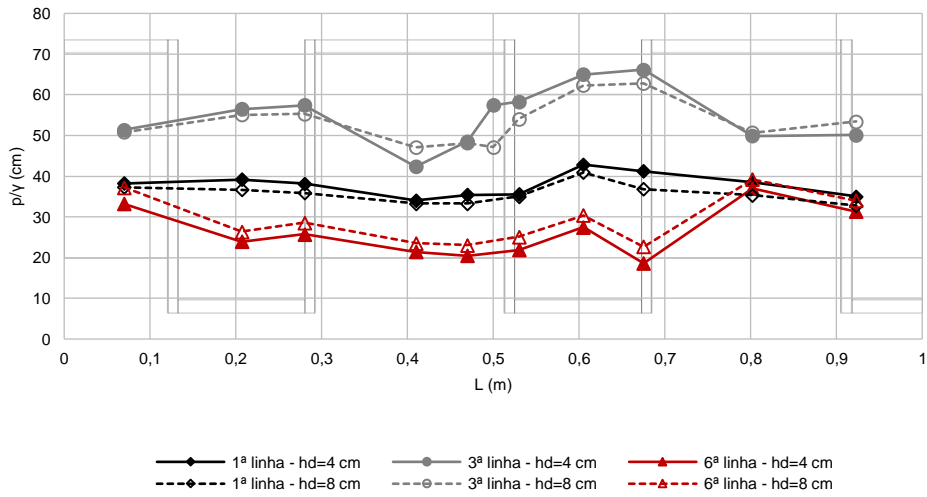


Figura 4.33 – Alturas piezométricas médias na secção inicial da bacia de dissipação de energia, para a posição 3 do ressalto hidráulico. Resultados obtidos com degraus de 4 e 8 cm de altura, para $Q=180$ l/s.

4.3.3. Evolução das alturas piezométricas ao longo da bacia de dissipação de energia

Por forma a se apresentar um conjunto de valores mais alargado no trecho de impacto, utilizam-se os valores das tomadas de pressão que se encontram a 3 cm do eixo de simetria da bacia de dissipação (Figura 4.34) e calcula-se a média dos valores de cada linha.

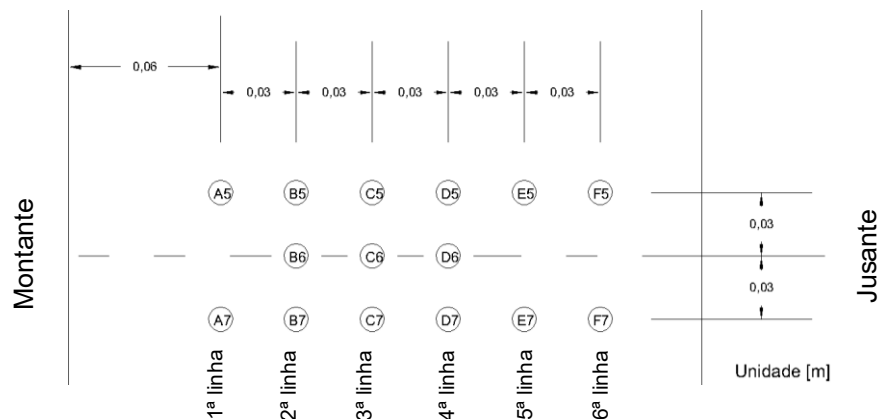


Figura 4.34 – Tomadas de pressão no trecho inicial em vidro acrílico, localizadas junto do eixo central.

Nas Figuras 4.35 e 4.36 apresentam-se as alturas piezométricas médias ao longo do eixo de simetria da bacia de dissipação obtidas no presente estudo e por Pinto (2017), para um descarregador com degraus de 8 cm de altura, nas três posições do ressalto e para os caudais de 80 l/s e de 180 l/s.

Analogamente ao estudo de Pinto (2017), observou-se que o aumento do grau de submersão conduz ao aumento das alturas piezométricas para a mesma distância ao pé do descarregador (s), sendo este aumento mais expressivo para o caudal de 80 l/s.

Para o caudal de 80 l/s, as alturas piezométricas obtidas por Pinto (2017) para a posição 2 do ressalto hidráulico são inferiores às obtidas no presente estudo. As alturas piezométricas para a posição 1 do ressalto são bastante próximas dos valores de Pinto (2017).

Para o caudal de 180 l/s, as alturas piezométricas obtidas por Pinto (2017) para as posições com maior grau de submersão (1 e 2) são idênticas às do presente estudo.

Para ambos os caudais, as alturas piezométricas obtidas por Pinto (2017) para a posição 3 do ressalto hidráulico são em geral ligeiramente superiores às obtidas neste estudo. Esta diferença nas alturas piezométricas obtidas pode decorrer do diferente posicionamento do início do ressalto hidráulico, tendo sido usada uma posição do ressalto hidráulico ligeiramente mais afogado no estudo de Pinto (2017).

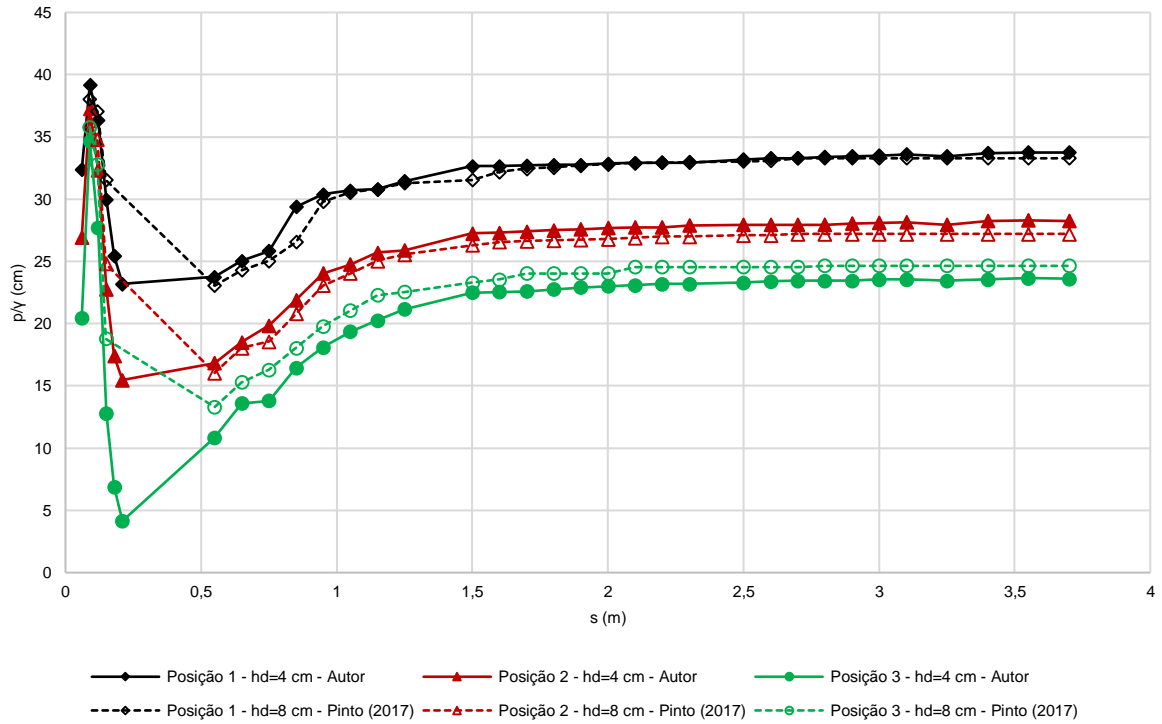


Figura 4.35 – Comparação das alturas piezométricas médias ao longo da bacia de dissipação, para as três posições do ressalto hidráulico com os valores obtidos por Pinto (2017), para um descarregador em degraus com $h_d=8$ cm; $Q=80$ l/s.

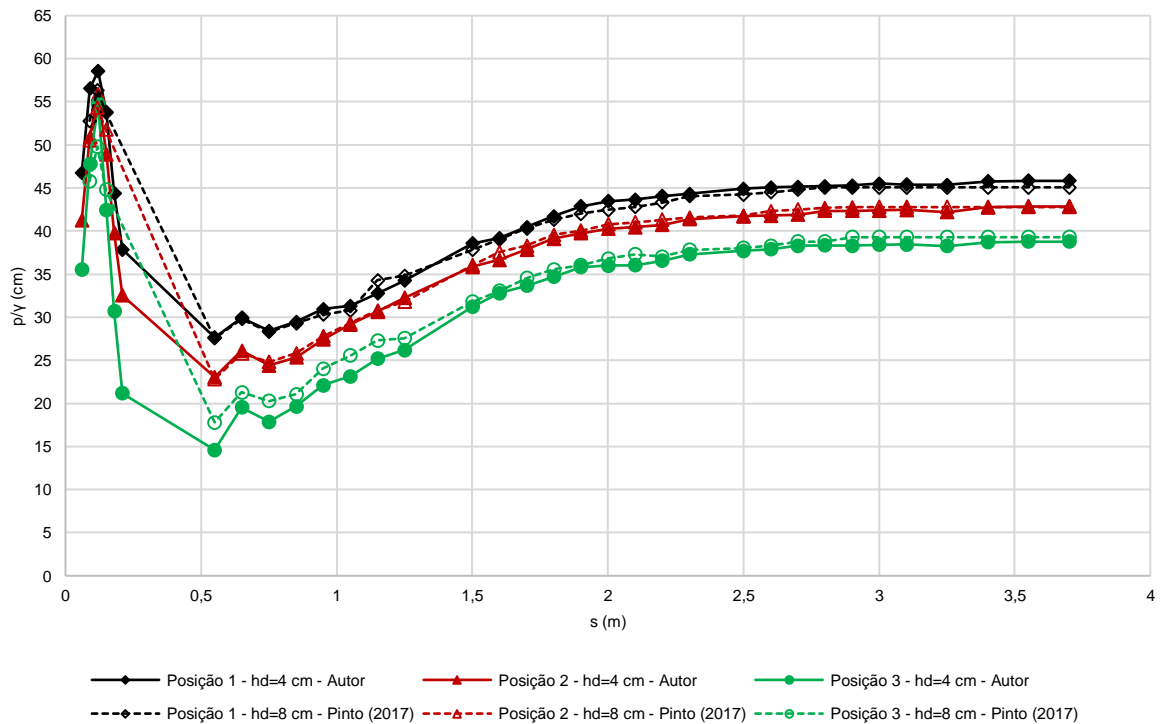


Figura 4.36 – Comparação das alturas piezométricas médias ao longo da bacia de dissipação, para as três posições do ressalto hidráulico com os valores obtidos por Pinto (2017), para um descarregador em degraus com $h_d=8$ cm; $Q=180$ l/s.

Na Tabela 4.1 apresentam-se as diferenças relativas entre as alturas piezométricas a jusante do ressalto hidráulico, para as posições 1 e 3, em relação à posição 2. Tal como observado por Pinto (2017), obtêm-se diferenças relativas mais elevadas para o menor caudal ensaiado.

Tabela 4.1 – Diferenças relativas entre as alturas piezométricas médias na secção a jusante do ressalto hidráulico na bacia de dissipação de energia, em relação à posição 2 do ressalto hidráulico.

Posição	Autor		Pinto (2017)	
	Q (l/s)		Q (l/s)	
	80	180	80	180
1	16,3%	6,5%	22,6%	5,3%
3	-19,7%	-10,4%	-23,5%	-8,2%

Para os caudais de 80 l/s, 100 l/s, 120 l/s, 140 l/s, 160 l/s e 180 l/s, apresenta-se na Figura 4.37 a evolução das alturas piezométricas médias para a posição 3 do ressalto hidráulico no presente estudo, para degraus de 4 e de 8 cm de altura. Com base na análise dos resultados retiram-se as seguintes conclusões:

- com o aumento do caudal escoado é possível observar: i) o aumento das alturas piezométricas na bacia de dissipação; ii) o deslocamento para jusante da altura piezométrica máxima na secção de impacto; iii) que as alturas piezométricas a jusante do ressalto tendem a estabilizar a uma distância maior do pé do descarregador;
- as alturas piezométricas a jusante do ressalto hidráulico obtidas no presente estudo para degraus de 4 cm de altura são próximas das obtidas para degraus de 8 cm de altura; no entanto, para os caudais superiores a 100 l/s, os valores obtidos para degraus de 4 cm de altura são ligeiramente superiores aos obtidos para degraus de 8 cm de altura.
- as alturas piezométricas no trecho de impacto obtidas para degraus de 4 cm de altura (Figura 4.38) são próximas das obtidas no mesmo trecho para degraus de 8 cm de altura; para a totalidade de caudais, as alturas piezométricas obtidas para degraus de 8 cm de altura são em geral ligeiramente superiores às alturas obtidas para degraus de 4 cm de altura, após a 4ª linha ($s=0,15$ m).

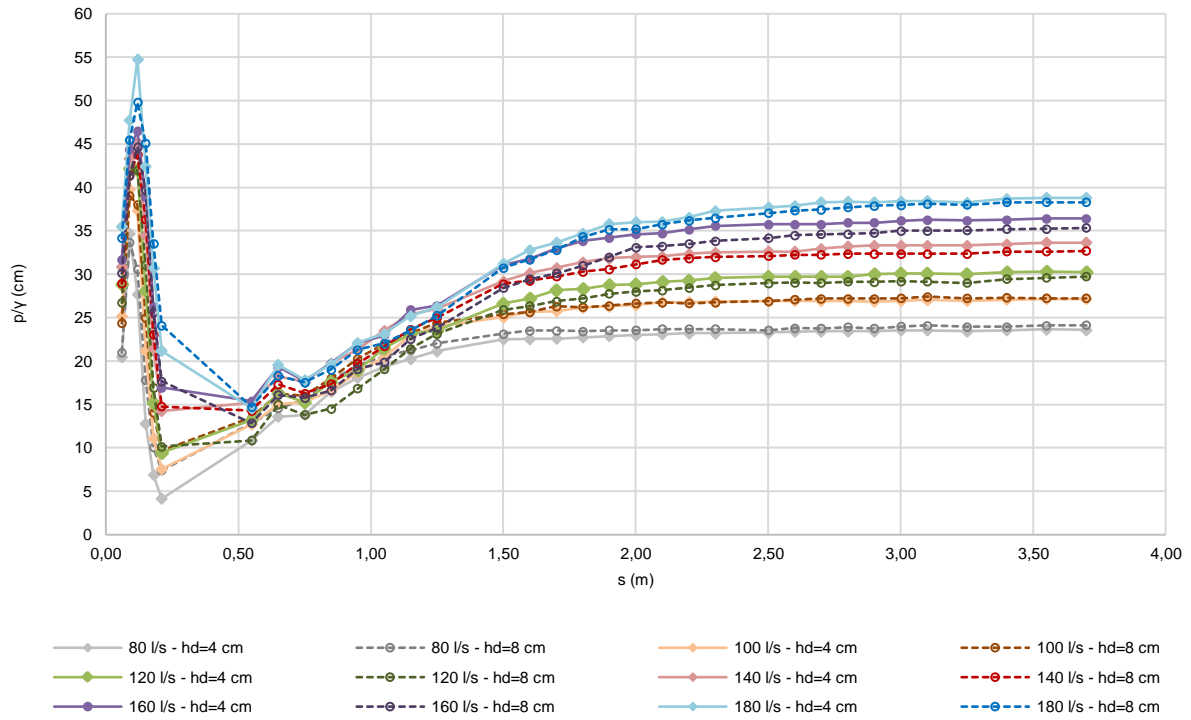


Figura 4.37 – Alturas piezométricas médias na bacia de dissipação sem acessórios, com início do ressalto hidráulico na posição 3.

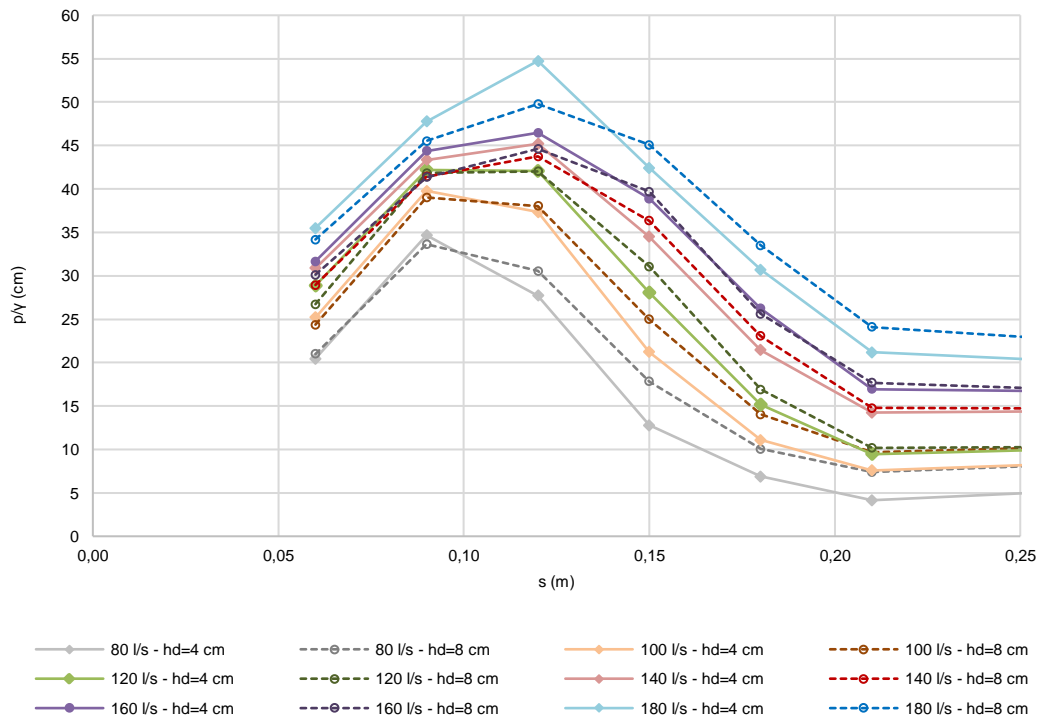


Figura 4.38 – Alturas piezométricas médias no trecho inicial da bacia de dissipação sem acessórios, com início do ressalto hidráulico na posição 3.

A partir das alturas piezométricas médias obtidas no presente estudo, assim como por Pinto (2017) e por Reis (2015), na mesma instalação experimental, procurou-se avaliar a adequabilidade das equações desenvolvidas por Meireles (2004) (Equações 4.4 e 4.5) para um conjunto de dados obtidos para um descarregador em degraus com soleira descarregadora do tipo PKW.

Os dados apresentados nas Figuras 4.39 e 4.40 foram obtidos:

- no presente estudo, com soleira descarregadora do tipo PKW, duas geometrias do descarregador em degraus ($h_d=4$ cm e $h_d=8$ cm) e caudais de 80, 100, 120, 140, 160 e 180 l/s;
- por Pinto (2017), com soleira descarregadora do tipo PKW, descarregador em degraus com $h_d=8$ cm e caudais de 80, 100, 120, 140 e 180 l/s;
- por Reis (2015), com soleira descarregadora do tipo PKW, descarregador em degraus com $h_d=8$ cm e caudais de 80, 100, 120 e 140 l/s.

As Equações (4.4) e (4.5) traduzem a relação entre a altura piezométrica média e a altura crítica (Equação 4.6) ao longo da bacia em função da distância ao pé do descarregador, adimensionalizada pela altura crítica. As equações foram desenvolvidas por Meireles (2004) a partir de um conjunto de dados obtidos na mesma instalação experimental para uma soleira descarregadora do tipo WES, para duas geometrias do descarregador em degraus ($h_d=4$ cm e $h_d=8$ cm) e caudais de 80, 100, 140, 180 e 200 l/s.

$$\frac{p}{\gamma} = \frac{3,68 - 5,23 \ln \frac{s}{h_c} + 5,67 \left(\ln \frac{s}{h_c} \right)^2}{1 - 0,86 \ln \frac{s}{h_c} + 3,85 \left(\ln \frac{s}{h_c} \right)^2} \quad \text{para} \quad \frac{s}{h_c} \leq 3,5 \quad (4.4)$$

$$\frac{p}{\gamma} = \frac{2,68}{1 + e^{\frac{5,57 - \frac{s}{h_c}}{4,05}}} \quad \text{para} \quad \frac{s}{h_c} \geq 3,5 \quad (4.5)$$

sendo

$$h_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}} \quad (4.6)$$

e em que g é a aceleração da gravidade, h_c a altura crítica do escoamento, q o caudal unitário de água, s a distância ao pé do descarregador e p/γ a altura piezométrica média.

As Equações (4.4) e (4.5) ajustam-se razoavelmente bem aos resultados obtidos para a soleira descarregadora do tipo PKW (Figuras 4.39 e 4.40).

A Equação (4.5) apresenta diferenças relativas inferiores em geral a 5% relativamente às alturas piezométricas a jusante do ressalto hidráulico (Figura 4.39), enquanto que a Equação (4.4) apresenta diferenças relativas maiores no trecho de impacto do escoamento, sendo contudo inferiores em geral a 20% para $s/h_c < 3,50$ (Figura 4.40).

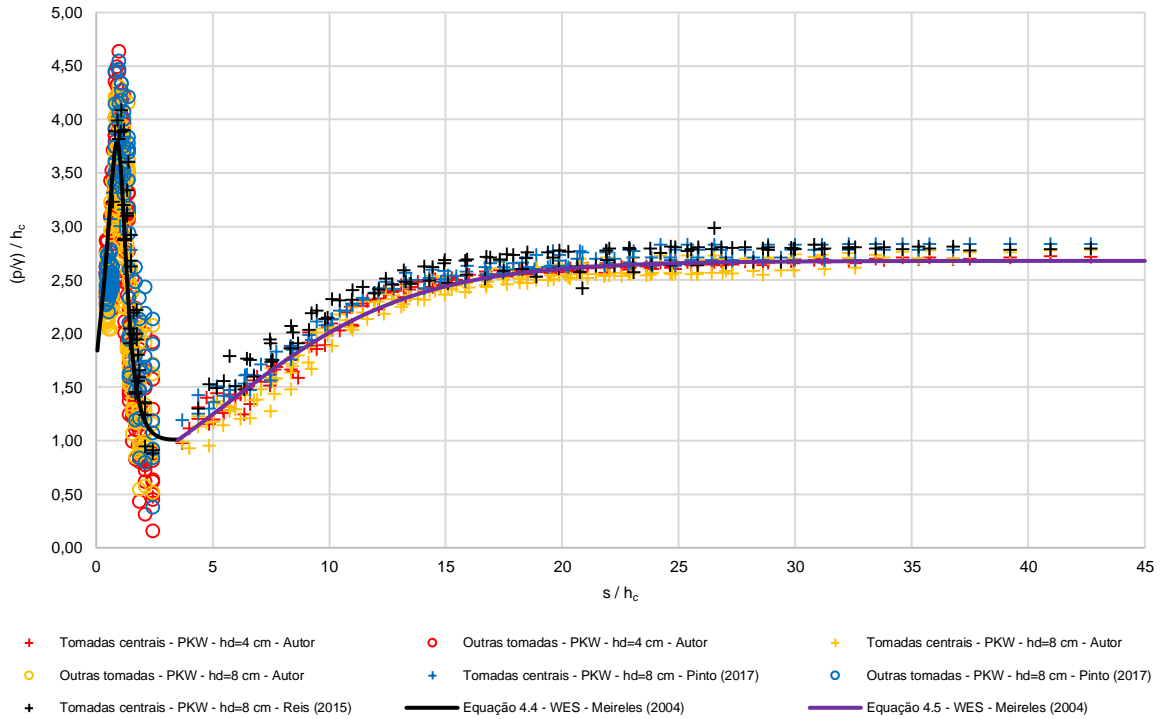


Figura 4.39 – Evolução da altura piezométrica média em função da distância ao pé do descarregador; ambas as grandezas estão adimensionalizadas pela altura crítica.

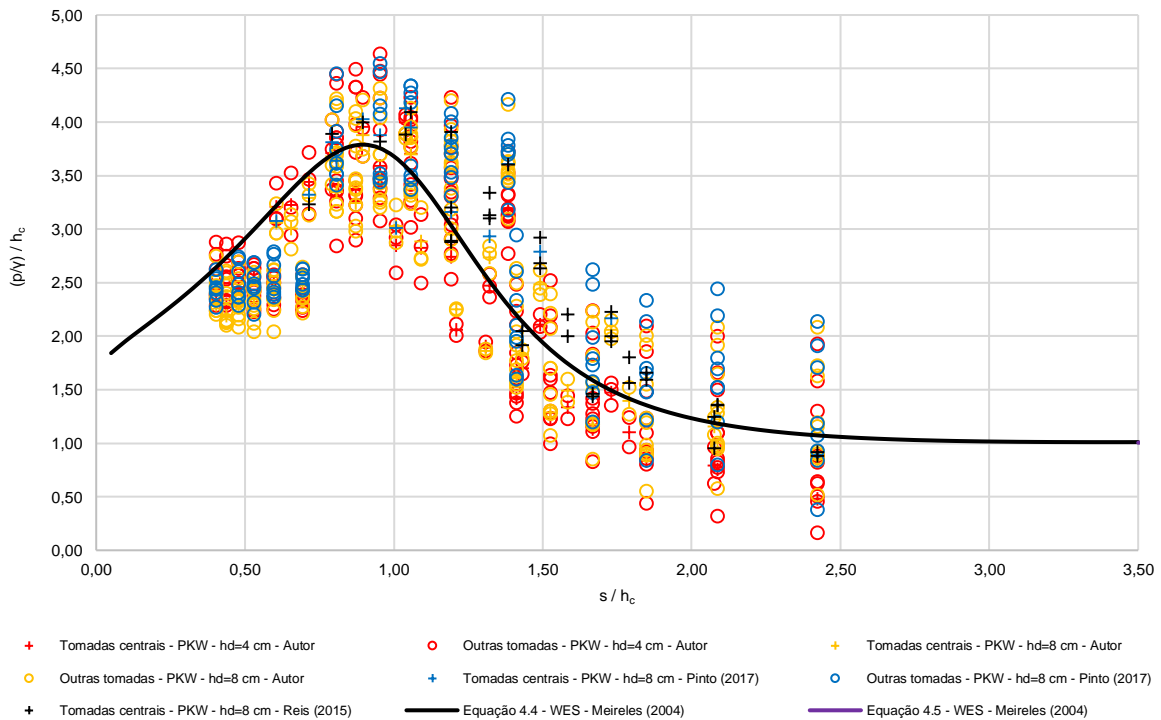


Figura 4.40 – Evolução da altura piezométrica média em função da distância ao pé do descarregador, no trecho inicial da bacia de dissipação; ambas as grandezas estão adimensionalizadas pela altura crítica.

4.3.4. Altura equivalente de água na secção de montante do ressalto e dissipação de energia

Nas Figuras 4.41 e 4.43 a 4.45, são apresentados os resultados obtidos no presente estudo para degraus de 4 e 8 cm de altura e por Meireles (2004), para uma soleira descarregadora do tipo WES e um descarregador em degraus ensaiado para duas geometrias, com degraus de 4 e 8 cm de altura.

Na Figura 4.41 apresentam-se os valores da altura equivalente de água a montante do ressalto hidráulico para a hipótese A (distribuição de pressões hidrostática na secção de montante do ressalto – Equação 2.2) e hipótese B (distribuição de pressões linear na secção de montante do ressalto – Equação 2.3). Com base na análise da Figura 4.41 formulam-se as seguintes observações:

- as alturas equivalentes de água na secção de montante do ressalto obtidas com degraus de 4 cm de altura são em geral ligeiramente inferiores às obtidas com degraus de 8 cm de altura (para soleira descarregadora idêntica).
- as alturas equivalentes de água na secção de montante do ressalto obtidas com soleira descarregadora do tipo PKW são ligeiramente inferiores às obtidas com soleira descarregadora do tipo WES (com degraus da mesma altura);
- para os resultados obtidos no presente estudo com soleira descarregadora do tipo PKW e com degraus de 4 e 8 cm de altura, obtém-se uma diferença relativa média de cerca de -3,0% e de -4,0% dos valores de altura equivalente de água a montante do ressalto para as hipóteses A e B, respetivamente;
- para os resultados obtidos com degraus de 4 cm, presente estudo (soleira do tipo PKW) e de Meireles (2004) (soleira do tipo WES), obtém-se uma diferença relativa média de cerca de -2,5% e de -5,5% dos valores de altura equivalente de água a montante do ressalto para as hipóteses A e B, respetivamente.

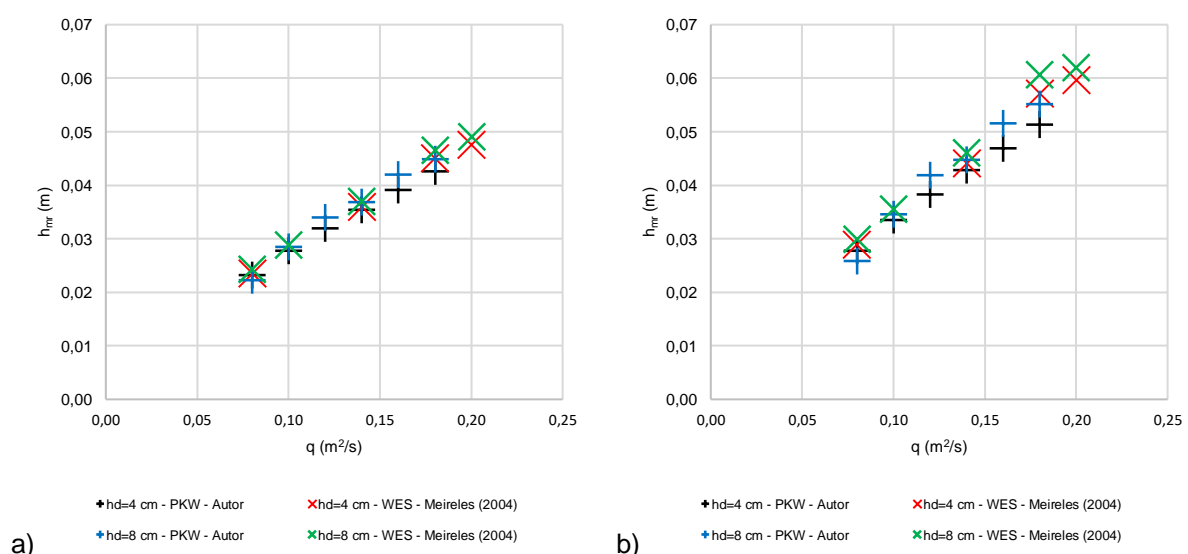


Figura 4.41 – Altura equivalente de água na secção de montante do ressalto hidráulico: a) hipótese A; b) hipótese B.

Na Figura 4.42 apresenta-se a energia específica residual na secção imediatamente a montante do ressalto considerando a distribuição de pressões hidrostática (hipótese A) e a distribuição de pressão linear obtida a partir de valores de alturas piezométricas medidas na soleira da bacia de dissipação (hipótese B).

Na Figura 4.43 apresenta-se a energia específica residual para ambas as hipóteses; com base na análise desta figura formulam-se as seguintes observações:

- as energias específicas residuais no pé do descarregador obtidas com degraus de 4 cm de altura são em geral ligeiramente superiores às obtidas com degraus de 8 cm de altura (para soleiras descarregadoras idênticas);
- as energias específicas residuais no pé do descarregador obtidas com soleira descarregadora do tipo PKW são em geral ligeiramente superiores às obtidas com soleira descarregadora do tipo WES (com degraus da mesma altura);
- para os resultados obtidos no presente estudo com soleira descarregadora do tipo PKW e com degraus de 4 e 8 cm de altura, obtém-se uma diferença relativa média de cerca de 6,0% e de 7,0% dos valores de energia específica residual no pé do descarregador para as hipóteses A e B, respetivamente;
- para os resultados obtidos com degraus de 4 cm de altura, no presente estudo (soleira do tipo PKW) e por Meireles (2004) (soleira do tipo WES), obtém-se uma diferença relativa média de cerca de 3,0% e de 6,5% dos valores de energia específica residual no pé do descarregador para as hipóteses A e B, respetivamente.

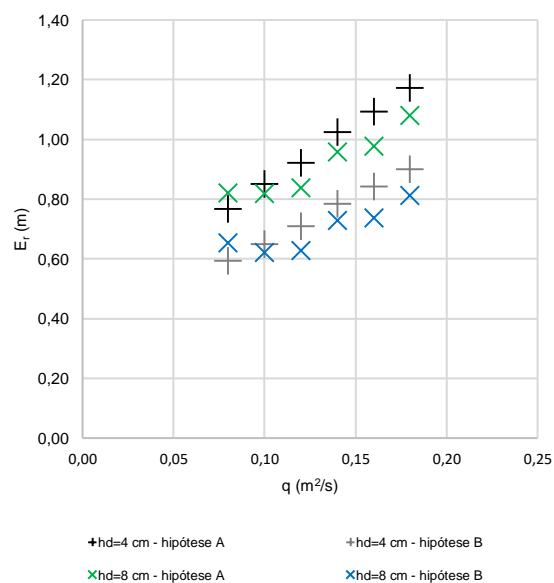


Figura 4.42 – Energia específica residual na secção de montante do ressalto hidráulico obtida para o presente estudo com degraus de 4 e 8 cm de altura.

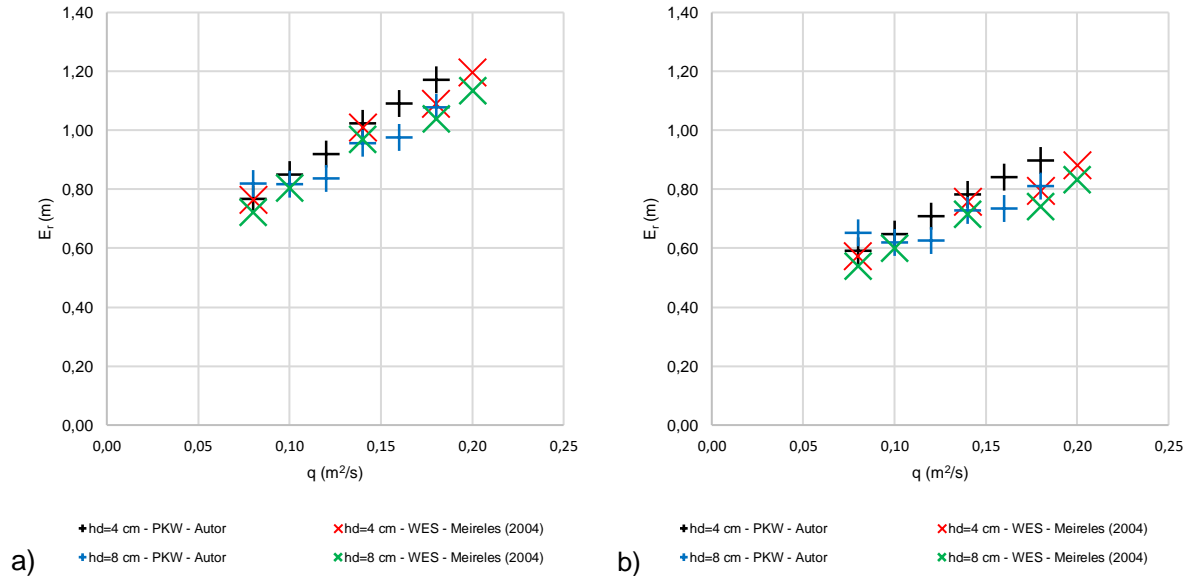


Figura 4.43 – Energia específica residual obtida para o presente estudo e obtida por Meireles (2004): a) hipótese A; b) hipótese B.

Na Figura 4.44 apresenta-se a relação entre a altura equivalente de água imediatamente a montante do ressalto hidráulico, obtida através das hipóteses A e B (h_{mrB}/h_{mrA}), em função da relação entre a altura crítica de escoamento e a altura dos degraus (h_c/h_d). Analogamente ao obtido por Meireles (2004), os valores da relação h_{mrB}/h_{mrA} praticamente não variam com h_c/h_d . A mesma conclusão é obtida para a relação entre os valores da energia específica residual (E_{rB}/E_{rA}).

As seguintes equações de regressão foram obtidas para a soleira descarregadora do tipo PKW (Equações 4.7 e 4.8) e para a totalidade de valores obtidos pelas soleiras descarregadoras do tipo PKW e do tipo WES (Equações 4.9 e 4.10):

$$\frac{h_{mrB}}{h_{mrA}} = 1,207 \quad (\text{PKW}) \quad (4.7)$$

$$\frac{E_{rB}}{E_{rA}} = 0,765 \quad (\text{PKW}) \quad (4.8)$$

$$\frac{h_{mrB}}{h_{mrA}} = 1,226 \quad (\text{PKW e WES}) \quad (4.9)$$

$$\frac{E_{rB}}{E_{rA}} = 0,757 \quad (\text{PKW e WES}) \quad (4.10)$$

em que E_{rA} é a energia específica residual na secção de montante do ressalto na hipótese A, E_{rB} a energia específica residual na secção de montante do ressalto na hipótese B, h_{mrA} a altura equivalente de água na secção de montante do ressalto na hipótese A e h_{mrB} a altura equivalente de água na secção de montante do ressalto na hipótese B.

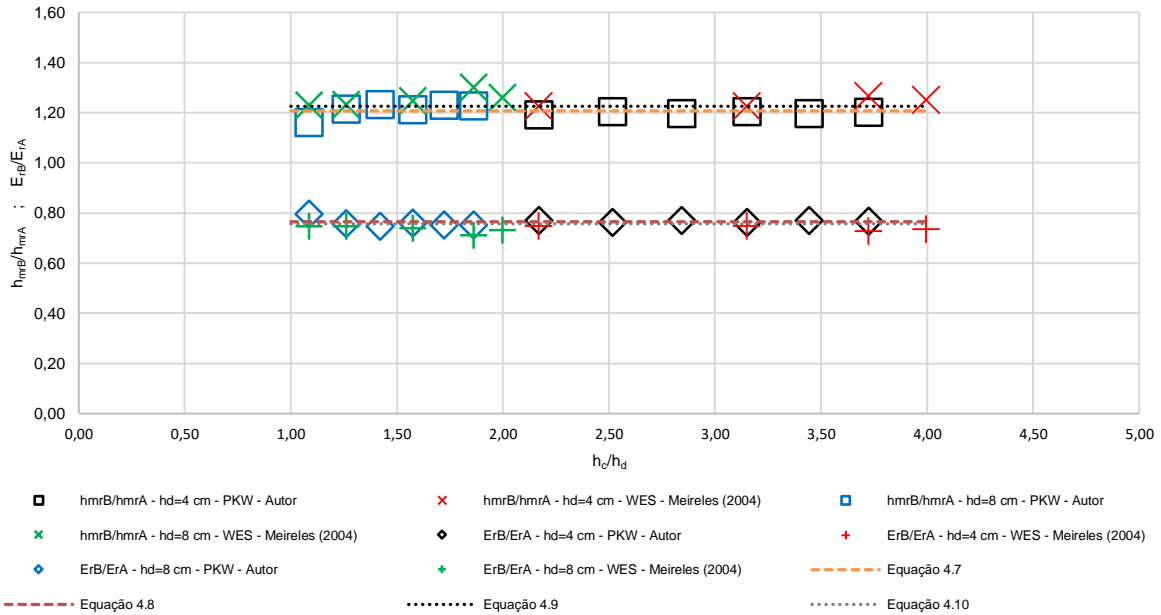


Figura 4.44 – Influência da consideração das hipóteses A e B nos valores da altura equivalente de água e da energia específica residual.

Aplicando a hipótese A aos resultados obtidos no presente estudo e por Meireles (2004), verifica-se uma subestimação de cerca de 18% nos valores da altura equivalente de água e uma sobrestimação de cerca de 32% nos valores da energia específica residual, comparativamente aos valores obtidos considerando a hipótese B. A hipótese de distribuição hidrostática de pressões na secção imediatamente a montante do ressalto não se afigura assim adequada.

Para situações em que apenas é possível ter resultados da medição da altura de água a jusante do ressalto é útil utilizar as Equações (4.9) e (4.10), que permitem estimar com maior rigor na gama de valores de h_c/h_d analisados, a altura equivalente de água e a energia específica residual imediatamente a jusante de descarregadores de cheias em degraus com declive próximo do utilizado no presente estudo e para soleiras descarregadoras do tipo WES ou do tipo PKW.

Nas Figuras 4.45 e 4.46 apresenta-se a perda de carga adimensionalizada pela altura crítica ($\Delta H/h_c$), em função da altura do descarregador adimensionalizada pela altura crítica (H_{desc}/h_c). A perda de carga total no descarregador é dada por:

$$\Delta H = E_{max} - E_r \quad (4.11)$$

sendo

$$E_{max} = H_{desc} + E_{crista} \quad (4.12)$$

e em que E_{crista} é a energia específica do escoamento no reservatório de entrada, medida em relação à crista da soleira descarregadora, E_{max} a energia específica máxima do escoamento, E_r a energia específica residual no pé do descarregador, H_{desc} a altura do descarregador (distância na vertical, entre

a crista da soleira descarregadora e a bacia de dissipação de energia) e ΔH a perda de carga total no descarregador.

Na instalação experimental do presente estudo, a altura do descarregador, desde a crista da soleira de entrada até à bacia de dissipação é igual a 2,90 m para a soleira descarregadora do tipo WES e igual a 2,96 m para a soleira descarregadora do tipo PKW.

Os resultados mostram que a perda de carga total no descarregador com soleira descarregadora do tipo PKW ($h_d=4$ cm) é em geral ligeiramente inferior à obtida com soleira do tipo WES ($h_d=4$ cm) (diferença relativa média de cerca de -1,5% e de -2,0% da perda de carga total, para as hipóteses A e B, respetivamente), o que é expectável atendendo aos resultados apresentados para a energia específica residual (Figura 4.43).

A perda de carga total no descarregador com degraus de 4 cm de altura (soleira do tipo PKW) é em geral ligeiramente inferior à obtida com degraus de 8 cm de altura (soleira do tipo PKW) (diferença relativa média de cerca de -2,5% e -2,0% da perda de carga, para as hipóteses A e B, respetivamente).

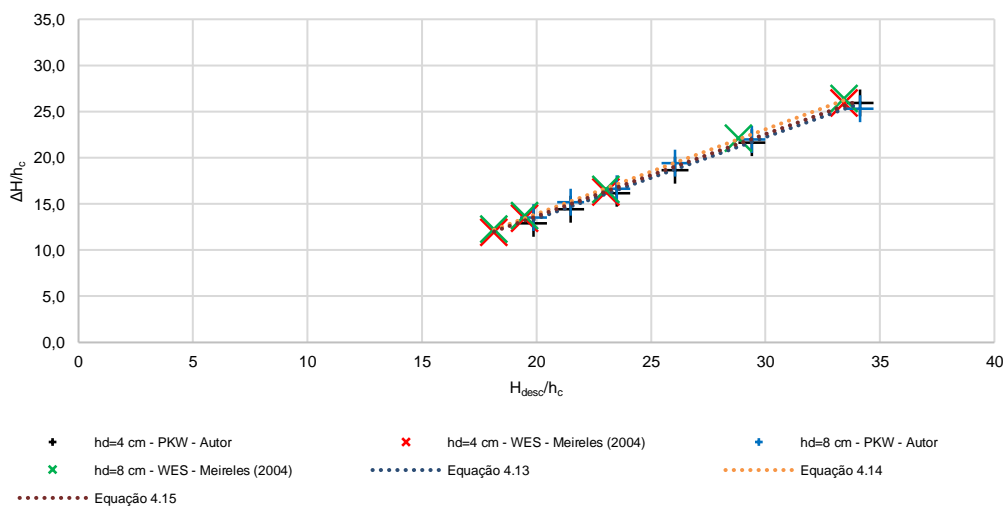


Figura 4.45 – Perda de carga adimensionalizada pela altura crítica; hipótese A.

Para os resultados obtidos com soleiras descarregadoras do tipo PKW e do tipo WES, obtiveram-se as seguintes equações de regressão de acordo com a hipótese A, respetivamente:

$$\frac{\Delta H}{h_c} = 0,883 \frac{H_{desc}}{h_c} - 4,262 ; R^2 = 0,994 \quad (\text{PKW}) \quad (4.13)$$

$$\frac{\Delta H}{h_c} = 0,917 \frac{H_{desc}}{h_c} - 4,429 ; R^2 = 0,998 \quad (\text{WES}) \quad (4.14)$$

$$\frac{\Delta H}{h_c} = 0,890 \frac{H_{desc}}{h_c} - 4,145 ; R^2 = 0,991 \quad (\text{PKW e WES}) \quad (4.15)$$

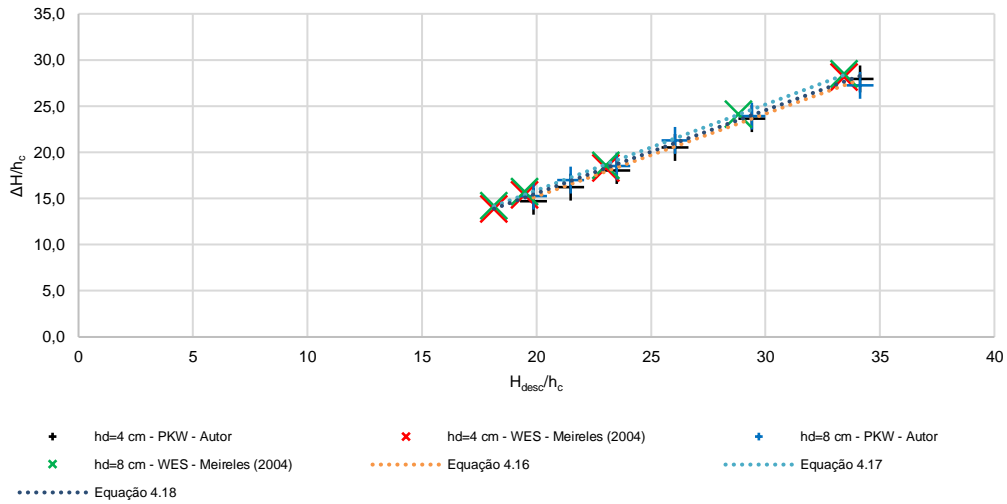


Figura 4.46 – Perda de carga adimensionalizada pela altura crítica; hipótese B.

Para os resultados obtidos com soleiras descarregadoras do tipo PKW e do tipo WES, obtiveram-se as seguintes equações de regressão de acordo com a hipótese B, respetivamente:

$$\frac{\Delta H}{h_c} = 0,896 \frac{H_{desc}}{h_c} - 2,712 ; R^2 = 0,994 \quad (\text{PKW}) \quad (4.16)$$

$$\frac{\Delta H}{h_c} = 0,930 \frac{H_{desc}}{h_c} - 2,717 ; R^2 = 0,998 \quad (\text{WES}) \quad (4.17)$$

$$\frac{\Delta H}{h_c} = 0,901 \frac{H_{desc}}{h_c} - 2,455 ; R^2 = 0,989 \quad (\text{PKW e WES}) \quad (4.18)$$

5. Conclusões

5.1. Síntese e conclusões

O presente estudo pretendeu contribuir para o estudo do escoamento deslizante sobre turbilhões em descarregadores de cheias em degraus com soleira descarregadora em teclado de piano e para o estudo do ressalto hidráulico em bacias de dissipação de energia a jusante de descarregadores do mesmo tipo.

Em relação ao estudo do escoamento deslizante sobre turbilhões, foi possível concluir que:

- para os caudais de 80 l/s e 140 l/s, o andamento dos perfis de concentração de ar nos eixos de simetria das teclas exterior e interior são bastante distintos. Analogamente ao observado por Reis (2015), os valores da concentração de ar do escoamento proveniente da tecla exterior são superiores aos originados pela tecla interior num trecho inicial, para idêntica distância ao fundo. Esta diferença deve-se ao escoamento fortemente arejado proveniente da tecla exterior, que conduz a uma elevada concentração de ar nos degraus iniciais, enquanto que no escoamento proveniente da tecla interior, apenas se verifica entrada de ar quando este atinge o descarregador em degraus;
- os perfis de concentração de ar provenientes dos eixos de simetria das teclas exterior e interior apresentam diferenças evidentes ao longo do descarregador; no início do trecho do descarregador, os perfis de concentração de ar obtidos no eixo de simetria da tecla exterior apresentam concentrações de ar superiores às obtidas para a tecla interior; a jusante do degrau 21, para o caudal de 80 l/s, ou do degrau 24, para o caudal de 140 l/s, aquele comportamento inverte-se e os perfis de concentração de ar obtidos no eixo de simetria da tecla interior apresentam concentrações de ar superiores às obtidas no eixo da tecla exterior;
- os perfis de concentração de ar obtidos no presente estudo estão em geral próximos dos perfis obtidos por Reis (2015), com soleira descarregadora idêntica e descarregador com degraus de 8 cm de altura, para ambos os caudais;
- para os caudais de 80 e 140 l/s, os perfis de concentração de ar obtidos por Meireles (2004), com soleira descarregadora do tipo WES e descarregador com degraus de 4 cm de altura estão em geral compreendidos entre os perfis obtidos no presente estudo nos eixos de simetria das teclas exterior e interior, com exceção do trecho inicial do descarregador, onde os perfis de concentração de ar obtidos são claramente distintos, o que resulta das diferentes condições do escoamento a jusante de soleiras descarregadoras do tipo PKW e do tipo WES;
- para o caudal de 140 l/s, os perfis de concentração de ar obtidos por Meireles (2004) nos degraus a jusante do trecho inicial (degraus 24, 27 e 30) são praticamente coincidentes com os perfis de concentração de ar obtidos no presente estudo no eixo de simetria da tecla interior;
- os valores de concentração média de ar ao longo do descarregador para o caudal de 80 l/s, são sempre superiores aos valores obtidos para o caudal de 140 l/s;

- para ambos os caudais, os valores de concentração média de ar obtidos por Reis (2015) apresentam o mesmo andamento ao longo do descarregador do que o observado no presente estudo; nos primeiros três degraus (para ambos os caudais), as concentrações médias de ar são idênticas, uma vez que o escoamento proveniente da soleira descarregadora é determinante nos valores iniciais de concentração de ar; a jusante dos primeiros três degraus, a concentração média de ar obtida por Reis (2015) aumenta gradualmente em relação à obtida neste estudo, nos eixos de simetria das teclas exterior e interior;
- para o caudal de 80 l/s e a jusante do degrau 19, as concentrações médias de ar obtidas por Meireles (2004) e Matos (1999) estão em geral compreendidas entre as concentrações médias de ar obtidas no presente estudo para os eixos de simetria das teclas exterior e interior; no final do descarregador, os valores de Meireles (2004) aproximam-se dos valores obtidos no eixo de simetria da tecla exterior;
- para o caudal de 140 l/s e a jusante do degrau 24, as concentrações médias de ar obtidas por Meireles (2004) e Matos (1999) estão em geral compreendidas entre as concentrações médias de ar obtidas no presente estudo;
- para ambos os caudais, as alturas representativas do escoamento (h e Y_{90}) no eixo de simetria da tecla interior são inicialmente superiores às do eixo de simetria da tecla exterior, invertendo-se a situação a jusante do degrau 21 e do degrau 24, para os caudais de 80 e 140 l/s, respetivamente;
- para ambos os caudais, as alturas representativas do escoamento (h e Y_{90}) obtidas por Reis (2015) são praticamente idênticas às obtidas neste estudo.

No que respeita ao estudo do ressalto hidráulico retiraram-se as seguintes conclusões:

- com o aumento do caudal escoado foi possível concluir que se obtém um aumento generalizado das alturas piezométricas na bacia de dissipação, bem como um deslocamento para jusante da altura piezométrica máxima na secção de impacto, e as alturas piezométricas a jusante do ressalto tendem a estabilizar a uma distância maior do pé do descarregador;
- as alturas piezométricas a jusante do ressalto hidráulico obtidas no presente estudo com degraus de 4 cm de altura são próximas das obtidas com degraus de 8 cm de altura; no entanto, para caudais superiores a 100 l/s, as alturas piezométricas a jusante do ressalto hidráulico obtidas para degraus de 4 cm de altura são ligeiramente superiores às obtidas para degraus de 8 cm de altura;
- as equações desenvolvidas por Meireles (2004) a partir de alturas piezométricas obtidas na mesma instalação experimental com soleira descarregadora do tipo WES e que traduzem a relação entre a altura piezométrica e a altura crítica ao longo da bacia, apresentam, no geral, um bom acompanhamento das alturas piezométricas adimensionalizadas pela altura crítica obtidas nos estudos com soleira descarregadora do tipo PKW;
- aplicando a hipótese A, verificou-se uma subestimação de cerca de 18% nos valores da altura equivalente de água e uma sobrestimação de cerca de 32% nos valores da energia específica residual, comparativamente aos valores obtidos considerando a hipótese B;

- as alturas equivalentes de água na secção de montante do ressalto obtidas com degraus de 4 cm de altura são ligeiramente inferiores às obtidas com degraus de 8 cm de altura (para soleira descarregadora idêntica) e as alturas equivalentes de água obtidas com soleira descarregadora do tipo PKW são ligeiramente inferiores às obtidas com soleira descarregadora do tipo WES (com degraus da mesma altura);
- as energias específicas residuais no pé do descarregador obtidas com degraus de 4 cm de altura são ligeiramente superiores às obtidas com degraus de 8 cm de altura (para soleira descarregadora idêntica) e as energias específicas residuais obtidas com soleira descarregadora do tipo PKW são em geral ligeiramente superiores às obtidas com soleira descarregadora do tipo WES (com degraus da mesma altura);
- a perda de carga total no descarregador obtida com degraus de 4 cm de altura é em geral ligeiramente inferior à obtida com degraus de 8 cm de altura (para soleira descarregadora idêntica) e a perda de carga total no descarregador com soleira descarregadora do tipo PKW é em geral ligeiramente inferior à obtida com soleira do tipo WES (com degraus da mesma altura).

5.2. Sugestões para prosseguimento do estudo

Na presente investigação pretendeu-se dar um contributo para o conhecimento da hidráulica de descarregadores de cheias em degraus com soleiras descarregadoras em teclado de piano. Contudo, existem ainda tópicos de investigação que permitem o prosseguimento do estudo na instalação experimental localizada no LNEC, nomeadamente:

- análise das grandezas representativas do escoamento no descarregador em degraus para um maior número de secções transversais, diferentes eixos longitudinais e um conjunto mais alargado de caudais;
- desenvolvimento de modelos teórico-experimentais para estimar as grandezas representativas do escoamento ao longo do descarregador e da bacia de dissipação, para um conjunto mais alargado de resultados experimentais;
- caracterização do escoamento de emulsão ar-água ao longo do descarregador e do ressalto hidráulico na bacia de dissipação com paramento liso e com degraus de 2 cm de altura, a jusante de soleiras descarregadoras em teclado de piano;
- estudo das grandezas representativas do escoamento para soleiras descarregadoras em teclado de piano com diferentes tipologias (tipos B, C e D).

Bibliografia

- Cardoso, G. (2007). Ressalto hidráulico em bacias de dissipação com acessório a jusante de descarregadores de cheias em degraus. Estudo experimental. Dissertação de mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa (Portugal).
- Chanson, H. (2001). The hydraulics of stepped chutes and spillways. Balkema (Holanda).
- Da Singhal, G., Sharma, N. (2011). Rehabilitation of Sawara Kuddu Hydroelectric Project – Model studies of Piano Key Weir in India. Proc. Intl Workshop on Labyrinths and Piano Key Weirs PKW 2011, CRC Press, pp. 241-250.
- Epicum, S., Archambeau, P., Dewals, B. & Piroton, M. (2017). Hydraulics of Piano Key Weirs: A review. Labyrinth and Piano Key Weirs III PKW 2017, Epicum et al. (Eds), pp. 27-36.
- Fael, C. (2000). escoamento em quedas sucessivas: Ocorrência e dissipação de energia. Dissertação de mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa (Portugal).
- Ho Ta Khanh, M., Sy Quat, D., Xuan Thuy, D. (2011). P.K. weirs under design and construction in Vietnam. Proc. Intl Workshop on Labyrinths and Piano Key Weirs PKW 2011, CRC Press, pp. 225-232.
- Laugier, F., Vermeulen, J. & Blancher, B. (2017). Overview of design and construction of 11 Piano Key Weirs spillways developed in France by EDF from 2003 to 2016. Labyrinth and Piano Key Weirs III PKW 2017, Epicum et al. (Eds), pp. 37-41.
- Leite Ribeiro, M., Pfister, M., Schleiss, A.J. (2013). Overview of Piano Key weir prototypes and scientific model investigation. Proceedings of the 2nd International Workshop on Labyrinth and Piano Key Weirs PKW 2013, pp. 273-281, Epicum et al. (Eds), CRC Press, Boca Raton, 2013.
- Lempérière, F., Ouamane, A. (2003). The piano keys weir: a new cost-effective solution for spillways. *Hidropower & Dams* 10(5), pp. 144-149.
- Lempérière, F., Vigny, J.P., Ouamane, A. (2011). General comments on Piano Key Weirs: The past and present. Proc. Intl Workshop on Labyrinths and Piano Key Weirs PKW 2011, CRC Press, pp. 17-25.
- Lencastre, A. (1996). Hidráulica Geral, Edição do autor.
- Machiels, O. (2012). Experimental study of the hydraulic behaviour of piano key weirs. PhD thesis, University of Liège.
- Manzanares, A. A. (1980). Hidráulica Geral. Técnica, AEIST, Vol. 2, Lisboa (Portugal).
- Matos, J. (1999). Emulsionamento de ar e dissipação de energia do escoamento em descarregadores em degraus. Dissertação de doutoramento, Instituto Superior Técnico, Lisboa (Portugal).
- Meiros, I. (2004). Caracterização do escoamento deslizante sobre turbilhões e energia específica residual em descarregadores em degraus. Dissertação de mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa (Portugal).

- Meireles, I. (2011). Hidráulica dos descarregadores em degraus: estudo experimental-numérico-teórico. Dissertação de doutoramento, Universidade de Aveiro, Aveiro (Portugal).
- Ohtsu, I., Yasuda, Y. (1997). Characteristics of flow conditions on stepped channels. Proc. 27th IAHR Congress, Theme D, IAHR, São Francisco (EUA), pp. 583-588.
- Peterka, A. J. (1958). Hydraulic design of stilling basins and energy dissipators. 8ª Edição, U.S. Department of the Interior, Water and Power Resources Service, Engineering Monograph nº25, Denver (EUA).
- Pfister, M., Erpicum, S., Machiels, O., Schleiss, A.J., Piroton, M. (2012). Discussion Discharge coefficient for free and submerged flow over Piano Key Weirs, Journal of Hydraulic Research 50(6), pp. 642-643.
- Pinto, M. (2017). Dissipação de energia em descarregadores de cheias em degraus com soleira em teclado de piano: estudo experimental. Dissertação de mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa (Portugal).
- Pralong, J., Vermeulen, J., Blancher, B., Laugier, F., Erpicum, S., Machiels, O., Piroton, M., Boillat, J-L., Leite Ribeiro M. & Schleiss, A. (2011). A naming convention for the Piano Key Weirs geometrical parameters. Labyrinth and Piano Key Weirs PKW 2011, pp. 271-278.
- Quintela A. (1998). Hidráulica. 6ª edição, ed. Fundação Calouste Gulbenkian.
- Reis, M. (2015). Estudo experimental do escoamento em descarregadores de cheias em degraus com soleira em teclado de piano. Dissertação de mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa (Portugal).
- Renna, F. (2004). Caratterizzazione Fenomenologica del Moto di un Fluido Bifasico Lungo Scaricatori a Gradini. Tese de doutoramento, Politécnico de Bari, Cosenza (Itália).
- Sun, Q. (2011). Hydraulic performance of USBR stilling basin. Tese de seminário. Hannover (Alemanha).
- Yasuda, Y., Ohtsu, I. (1999). Flow resistance of skimming flow in stepped channels. Proc. 28th IAHR Congress, Theme B, B14, Graz (Áustria).
- Yasuda, Y., Ohtsu, I. (2003). Effect of step cavity area on flow characteristics of skimming flows on stepped chutes. Proc. 30th IAHR Congress, Theme D, IAHR, Salónica (Grécia), pp. 703-710.

Anexo 1 – Curva de vazão da soleira descarregadora em teclado de piano

No início dos ensaios experimentais considerou-se importante determinar a curva de vazão da soleira descarregadora do tipo PKW com o objetivo de ganhar algum à vontade com a instalação experimental.

Na Figura A1.1 apresenta-se a curva de vazão obtida neste estudo, bem como a de Reis (2015) e de Pinto (2017), para a soleira descarregadora do tipo PKW, assim como a curva de vazão obtida por Matos (1999), Meireles (2004) e Cardoso (2007), para uma soleira descarregadora do tipo WES, instalada anteriormente na instalação experimental.

A curva de vazão obtida neste estudo é praticamente coincidente com as curvas de vazão obtidas por Reis (2015) e por Pinto (2017), como seria expectável. Analogamente aos estudos anteriores, verifica-se que o caudal escoado na soleira descarregadora do tipo PKW é cerca de três vezes superior ao da soleira descarregadora do tipo WES, para uma carga hidráulica sobre a crista de 5 cm, e aproximadamente o dobro do caudal escoado, para uma carga hidráulica sobre a crista de 12 cm.

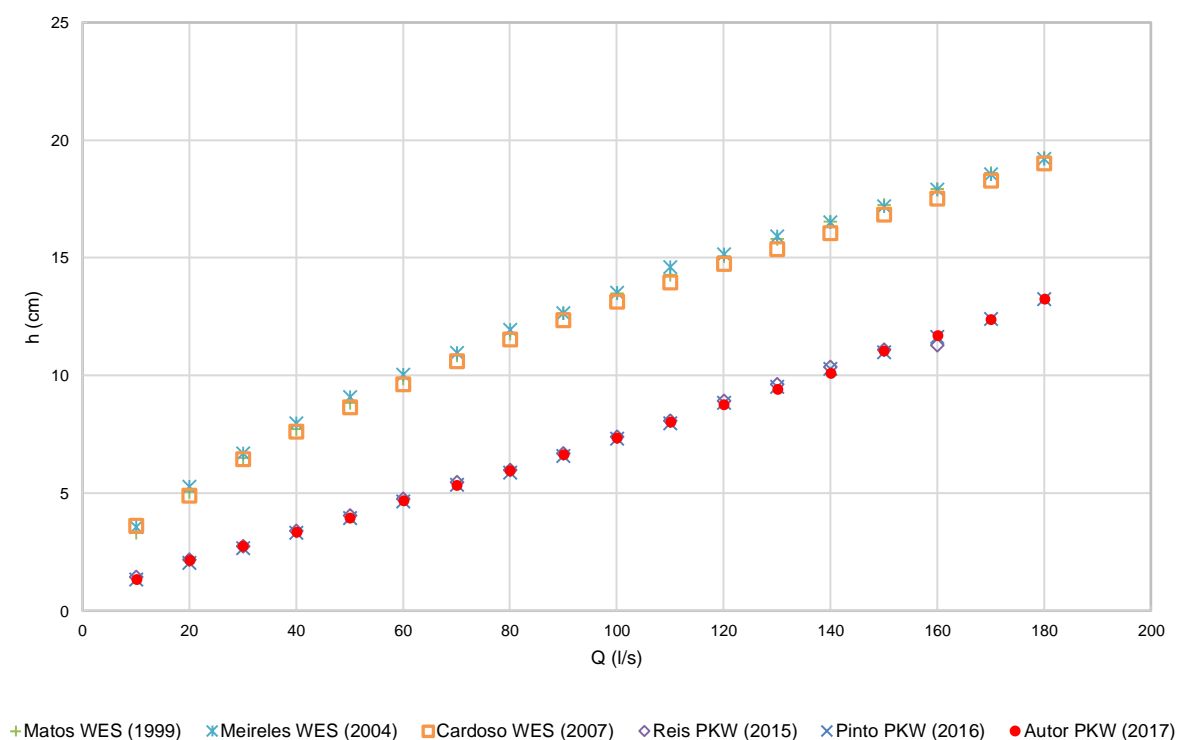


Figura A1.1 – Curvas de vazão das soleiras descarregadoras em teclado de piano e do tipo WES.

Anexo 2 – Alturas piezométricas médias e alturas do escoamento ao longo da bacia de dissipação de energia

Neste anexo apresentam-se os resultados obtidos na bacia de dissipação sem acessórios, para caudais de 80, 100, 120, 140, 160 e 180 l/s e para três posições de início do ressalto hidráulico. Para cada caudal apresentam-se as alturas piezométricas médias nos alinhamentos transversais da bacia de dissipação e as alturas piezométricas médias no eixo de simetria do canal, conjuntamente com as alturas médias do escoamento junto da parede ao longo da bacia de dissipação de energia, por observação visual.

No trecho da bacia em que ocorre o ressalto hidráulico, o perfil médio das alturas piezométricas tem geralmente valores inferiores aos das alturas do escoamento, em resultado do emulsionamento de ar. No trecho a jusante do ressalto, os valores são muito próximos. No trecho inicial, as alturas piezométricas médias na 1ª linha apresentam em geral uma distribuição uniforme. Com o aumento do caudal, observa-se o deslocamento da distribuição de alturas piezométricas máximas, no trecho inicial, da 2ª linha para a 3ª linha. Também com o aumento do caudal, observa-se o aumento da irregularidade na distribuição das alturas piezométricas médias, mais notório na distribuição da 3ª linha.

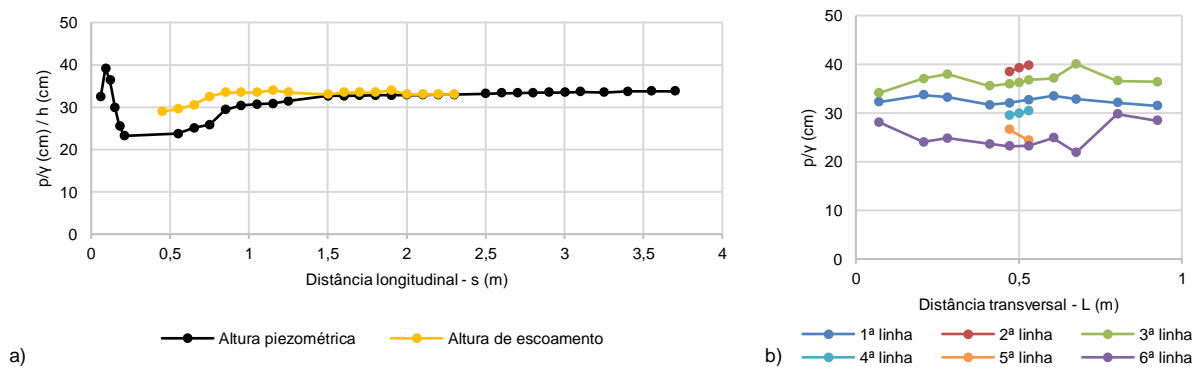


Figura A2.1 – Alturas piezométricas médias e alturas médias do escoamento na posição 1 do ressalto, para o caudal de 80 l/s: a) evolução longitudinal; b) distribuição transversal das alturas piezométricas médias.

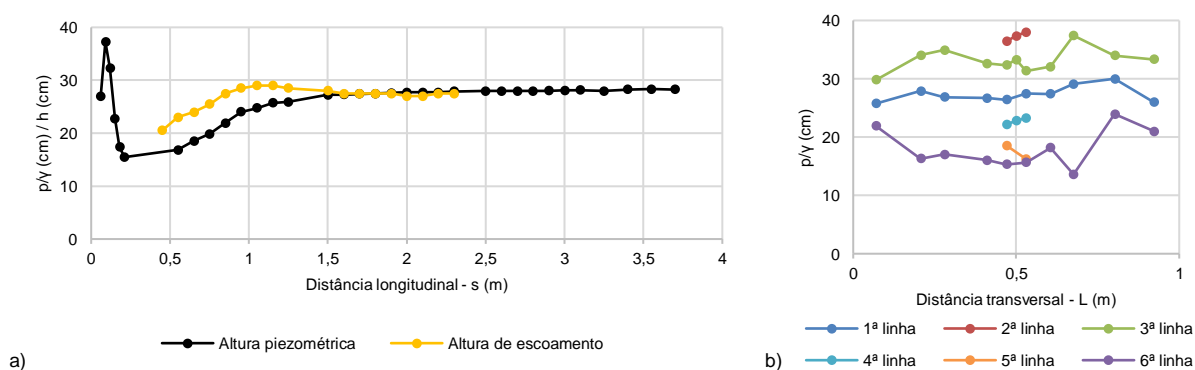
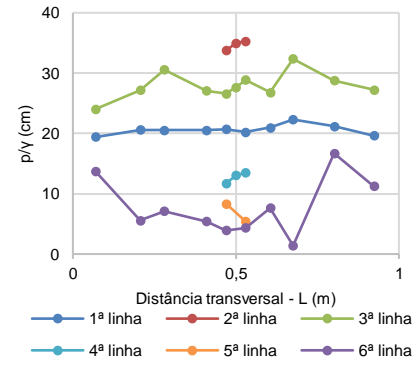
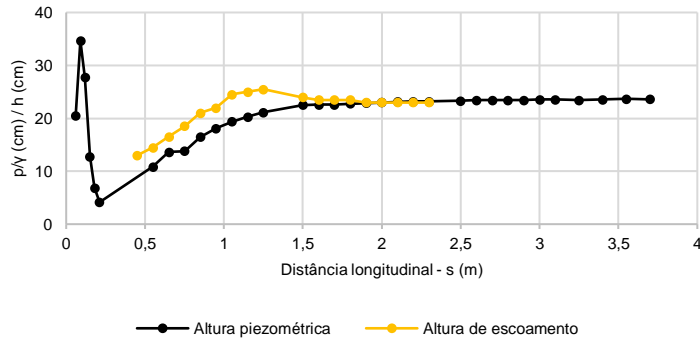
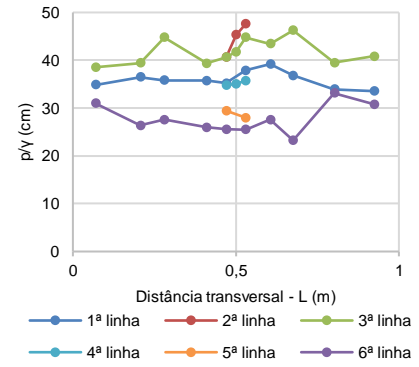
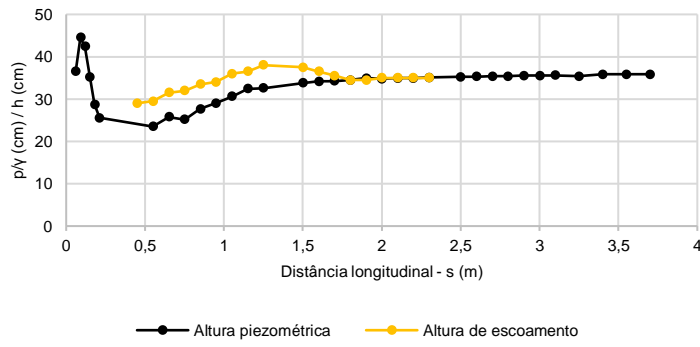


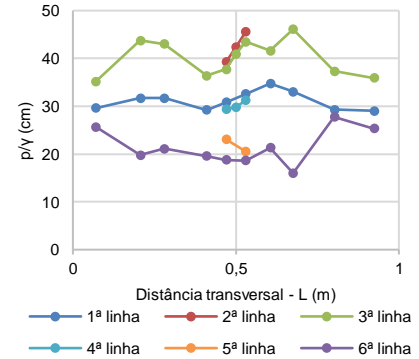
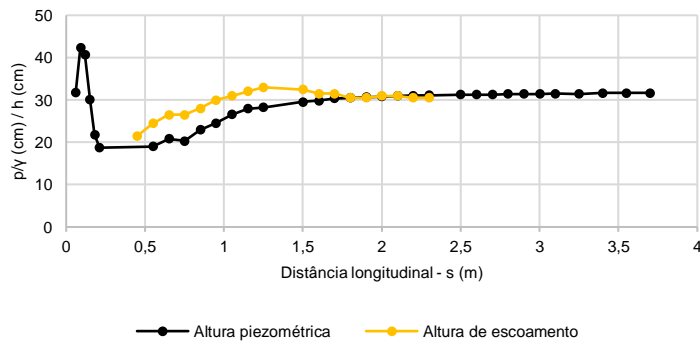
Figura A2.2 – Alturas piezométricas médias e alturas médias do escoamento na posição 2 do ressalto, para o caudal de 80 l/s: a) evolução longitudinal; b) distribuição transversal das alturas piezométricas médias.



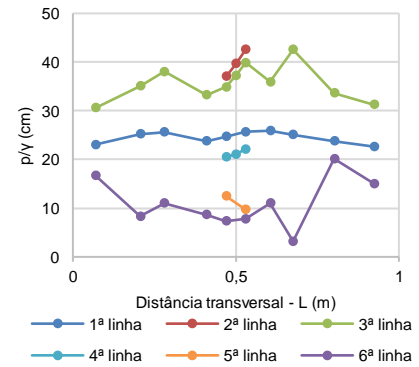
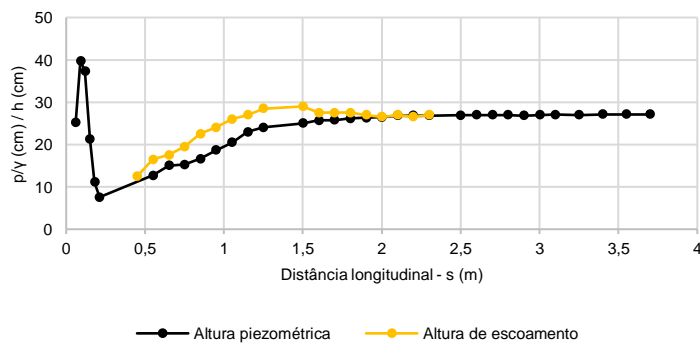
a) **Figura A2.3 – Alturas piezométricas médias e alturas médias do escoamento na posição 3 do ressalto, para o caudal de 80 l/s: a) evolução longitudinal; b) distribuição transversal das alturas piezométricas médias.**



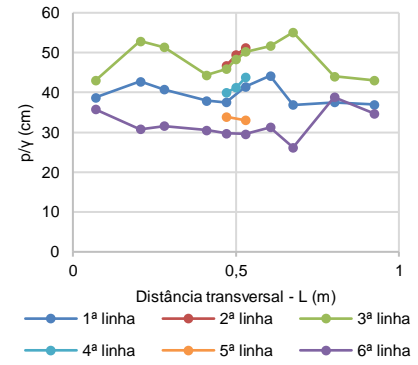
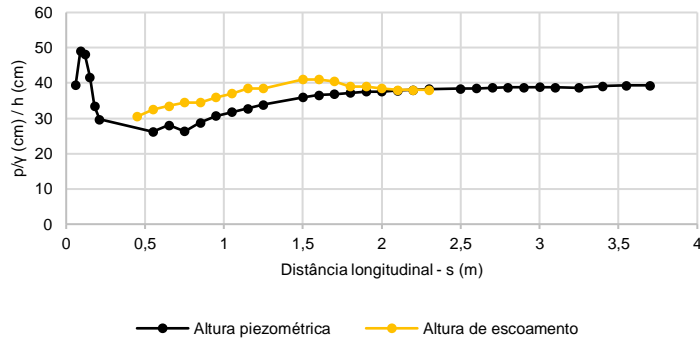
a) **Figura A2.4 – Alturas piezométricas médias e alturas médias do escoamento na posição 1 do ressalto, para o caudal de 100 l/s: a) evolução longitudinal; b) distribuição transversal das alturas piezométricas médias.**



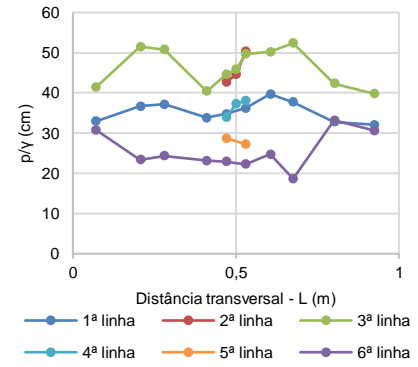
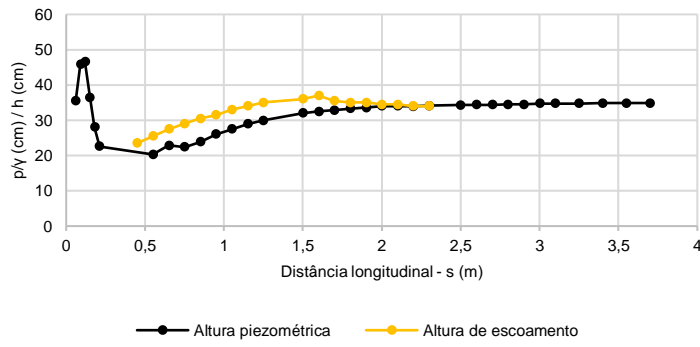
a) **Figura A2.5 – Alturas piezométricas médias e alturas médias do escoamento na posição 2 do ressalto, para o caudal de 100 l/s: a) evolução longitudinal; b) distribuição transversal das alturas piezométricas médias.**



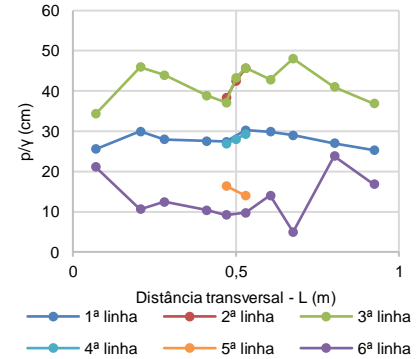
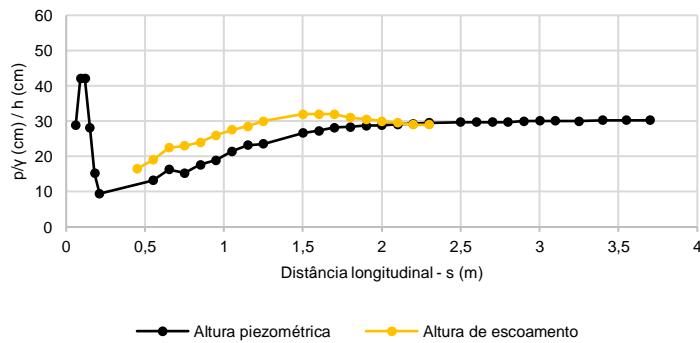
a) **Figura A2.6 – Alturas piezométricas médias e alturas médias do escoamento na posição 3 do ressalto, para o caudal de 100 l/s: a) evolução longitudinal; b) distribuição transversal das alturas piezométricas médias.**



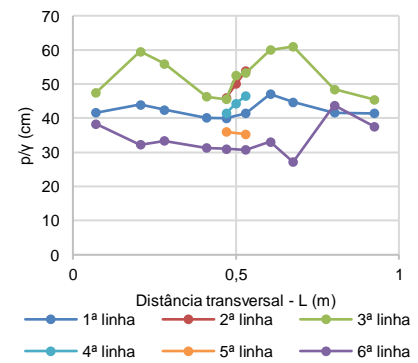
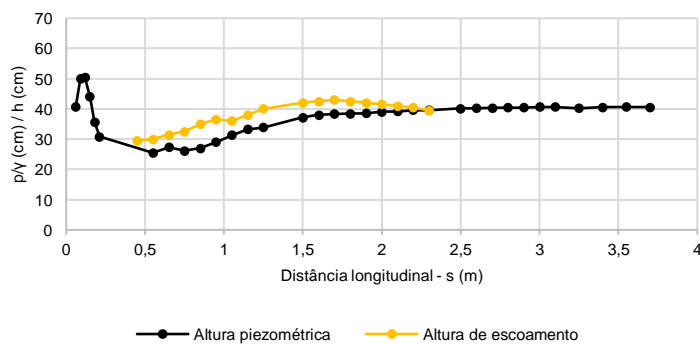
a) **Figura A2.7 – Alturas piezométricas médias e alturas médias do escoamento na posição 1 do ressalto, para o caudal de 120 l/s: a) evolução longitudinal; b) distribuição transversal das alturas piezométricas médias.**



a) **Figura A2.8 – Alturas piezométricas médias e alturas médias do escoamento na posição 2 do ressalto, para o caudal de 120 l/s: a) evolução longitudinal; b) distribuição transversal das alturas piezométricas médias.**



a) **Figura A2.9 – Alturas piezométricas médias e alturas médias do escoamento na posição 3 do ressalto, para o caudal de 120 l/s: a) evolução longitudinal; b) distribuição transversal das alturas piezométricas médias.**



a) **Figura A2.10 – Alturas piezométricas médias e alturas médias do escoamento na posição 1 do ressalto, para o caudal de 140 l/s: a) evolução longitudinal; b) distribuição transversal das alturas piezométricas médias.**

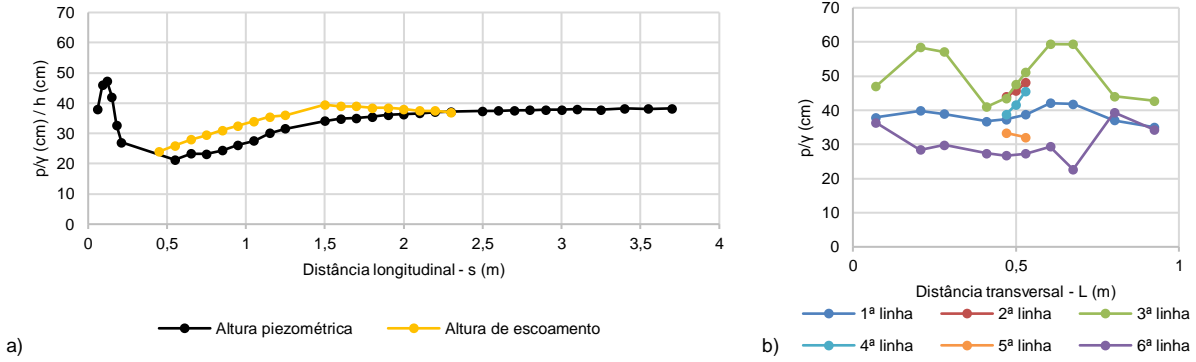


Figura A2.11 – Alturas piezométricas médias e alturas médias do escoamento na posição 2 do ressalto, para o caudal de 140 l/s: a) evolução longitudinal; b) distribuição transversal das alturas piezométricas médias.

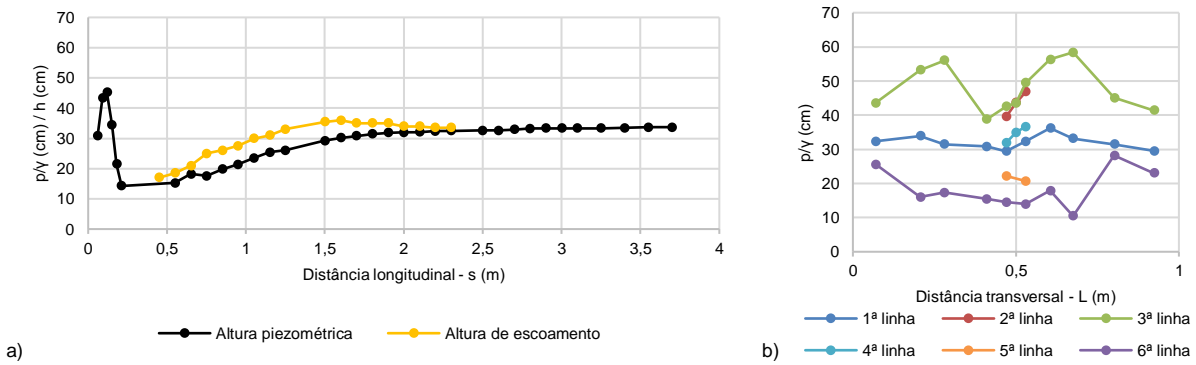


Figura A2.12 – Alturas piezométricas médias e alturas médias do escoamento na posição 3 do ressalto, para o caudal de 140 l/s: a) evolução longitudinal; b) distribuição transversal das alturas piezométricas médias.

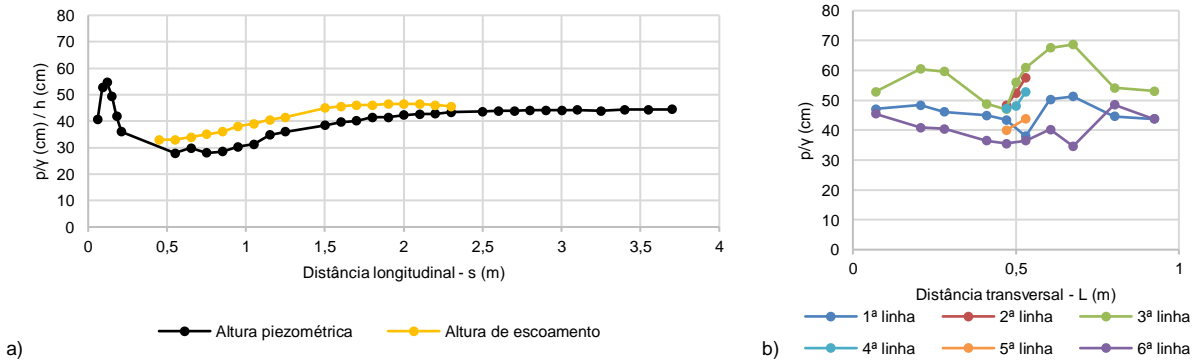


Figura A2.13 – Alturas piezométricas médias e alturas médias do escoamento na posição 1 do ressalto, para o caudal de 160 l/s: a) evolução longitudinal; b) distribuição transversal das alturas piezométricas médias.

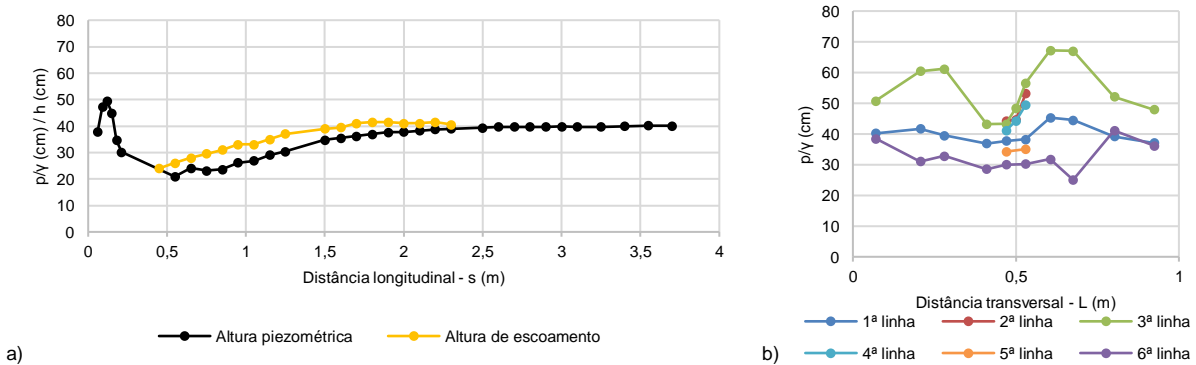
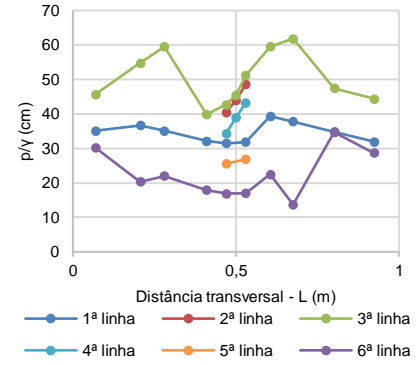
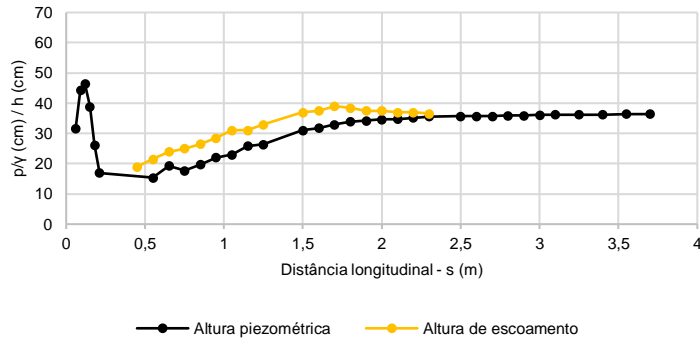
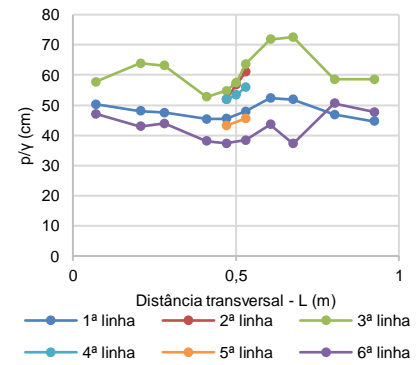
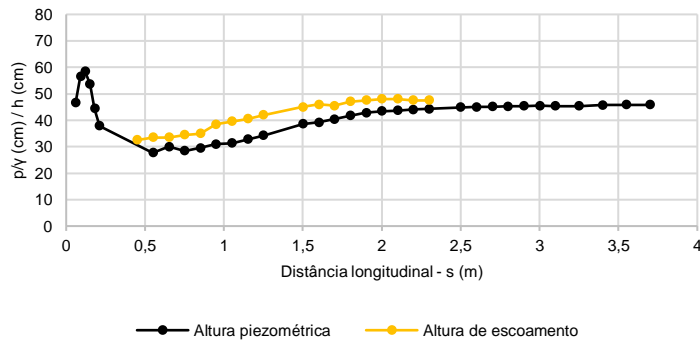


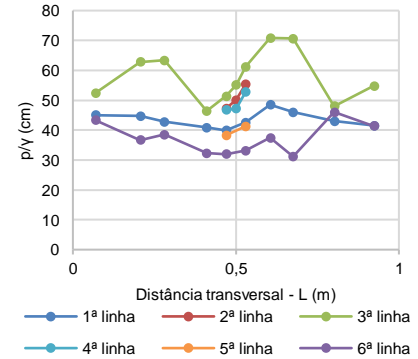
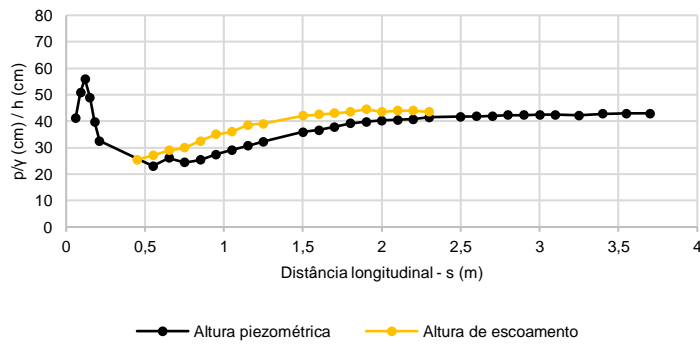
Figura A2.14 – Alturas piezométricas médias e alturas médias do escoamento na posição 2 do ressalto, para o caudal de 160 l/s: a) evolução longitudinal; b) distribuição transversal das alturas piezométricas médias.



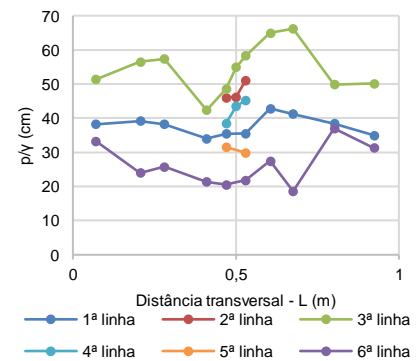
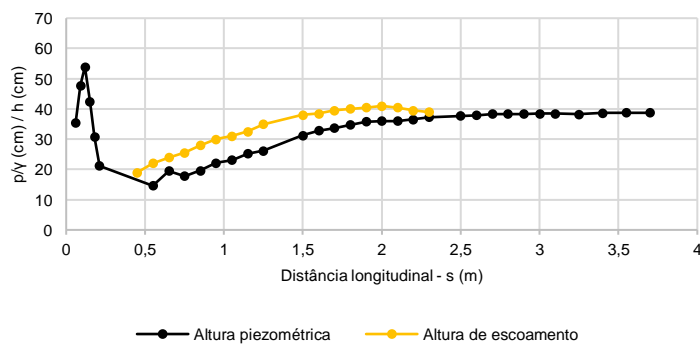
a) **Figura A2.15 – Alturas piezométricas médias e alturas médias do escoamento na posição 3 do ressalto, para o caudal de 160 l/s: a) evolução longitudinal; b) distribuição transversal das alturas piezométricas médias.**



a) **Figura A2.16 – Alturas piezométricas médias e alturas médias do escoamento na posição 1 do ressalto, para o caudal de 180 l/s: a) evolução longitudinal; b) distribuição transversal das alturas piezométricas médias.**



a) **Figura A2.17 – Alturas piezométricas médias e alturas médias do escoamento na posição 2 do ressalto, para o caudal de 180 l/s: a) evolução longitudinal; b) distribuição transversal das alturas piezométricas médias.**



a) **Figura A2.18 – Alturas piezométricas médias e alturas médias do escoamento na posição 3 do ressalto, para o caudal de 180 l/s: a) evolução longitudinal; b) distribuição transversal das alturas piezométricas médias.**