

DESCARREGADORES DE CHEIA EM CANAL, EM BETÃO, NÃO CONVENCIONAIS

MARIA JOÃO FERNANDES ALVES MARQUES ANTUNES

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM HIDRÁULICA

Orientador: Professora Doutora Maria Fernanda Quintela da Silva
Proença

FEVEREIRO DE 2011

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2010/2011

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2010/2011 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2011.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respectivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão electrónica fornecida pelo respectivo Autor.

A meus Avós, Pais e Tios

Não há nada totalmente perfeito

Horácio

AGRADECIMENTOS

O desenvolvimento desta dissertação contou com a colaboração de pessoas que tanto através de orientação técnica e científica como através do incentivo, amizade e amor incondicionais, tornaram este caminho mais fácil e suportável. A estas pessoas que directa ou indirectamente tornaram este projecto uma realidade, pretendo exprimir o meu reconhecimento e agradecimento. Apesar de correr o risco de esquecimentos indesejáveis, não poderia deixar de particularizar algumas pessoas, que pelo seu contributo, se tornaram mais preponderantes.

Em primeiro lugar refiro o apoio, a disponibilidade e os padrões de exigência sempre elevados transmitidos pela Professora Doutora Maria Fernanda Quintela da Silva Proença, a quem agradeço as linhas orientadoras com que me guiou, apresentando os seus comentários, conselhos e sugestões, imprescindíveis à realização deste trabalho.

À Professora Elsa Maria Silva Carvalho pelo apoio e amizade; demonstrados no dia-a-dia de trabalho.

Ao Rui Jorge Ferreira Aleixo pela preciosa contribuição na valorização técnica deste trabalho.

Ao Sr. Aníbal Lopes de Sousa Miranda pela criatividade, engenho e empenho na tentativa de auxiliar à procura da melhor solução técnica;

À Telma pela grande amizade e apoio incondicional demonstrado ao longo dos anos de curso.

A Ana Catarina e Tiago pela ajuda, animo transmitido, ideias e bons momentos que me proporcionaram na elaboração deste trabalho.

Ao escoamento crítico, pela partilha de pelos bons momentos passados e companheirismo demonstrado em todas as situações enquanto alunos de opção de Hidráulica.

A todos os amigos de curso cujo apoio, confiança e amizade ao longo deste percurso o tornaram menos tortuoso.

Ao André pelo apoio total, pela ajuda preciosa, pela compreensão, pela paciência e carinho que me permitiu levar a bom termo esta dissertação.

À Ana Luísa gostaria de agradecer, para além das fotografias que em muito contribuíram para valorização gráfica do presente trabalho, a amizade e companheirismo sempre presentes.

Não menos importante é o agradecimento à minha família, em especial aos meus Pais, Avós e Irmãos, pelo carinho, ensinamentos, experiencias de vida, pelos sacrifícios e apoio sempre incondicional em todos os momentos da minha vida com os quais me permitiram tornar uma pessoa melhor.

RESUMO

O presente trabalho centrou-se no estudo experimental, em modelo reduzido, de um descarregador de cheias em degraus, tendo como principais temáticas as características de escoamento verificadas ao longo do canal descarregador e a dissipação de energia obtida.

Para tal, foi utilizada a instalação já existente no Laboratório de Hidráulica Recursos Hídricos e Ambiente da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto na qual integra o modelo reduzido de um descarregador em degraus em betão.

Nos ensaios realizados foram observados através de metodologia adequada os regimes de escoamento e medidas as alturas médias de água para cada degrau. Com o conhecimento das alturas de água foi possível calcular algumas das características principais do escoamento ao longo do canal, tais como velocidade do escoamento, energia a cada degrau e estimar posteriormente a dissipação de energia.

Com o conhecimento destas características foi possível o estudo comparativo com outros descarregadores de cheia em degraus com características diferentes, nomeadamente com os apresentados em bibliografia e com um descarregador em degraus com características geométricas semelhantes mas com elevada rugosidade.

No final foi feito um estudo comparativo segundo duas linhas orientadoras. Numa primeira fase foi feita uma análise comparativa com o descarregador de rugosidade superior, em que se verificou a eficiência em termos de dissipação de energia deste. Na fase seguinte foi feita a análise comparativa com o proposto pelas referências mencionadas, da qual foi possível verificar uma coerência das propostas relativamente a regimes de escoamento e dissipação de energia.

PALAVRAS-CHAVE: Descarregador de cheia em degraus, Dissipação de Energia, Escoamento deslizante sobre turbilhões, Paredes convergentes, Modelo reduzido.

ABSTRACT

This work is based on the experimental study of a reduced scale model of a stepped spillway, focusing on spill characteristics throughout the spillway and energy dissipation.

For this purpose, the instalment already present in the Laboratório de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto was used, which integrated the reduced scale model of a concrete stepped spillway.

During the various trials and through adequate methodology, the flow regimes and the mean water heights for each step were measured. With knowledge of the latter, it was possible to calculate some of the flow characteristics throughout the spillway, such as flow speed and energy through each step and estimate energy dissipation.

Knowing these characteristics, it was then possible to compare the present model with other stepped spillways with different characteristics, namely those described in the bibliography and with a geometrically similar stepped spillway but with a high roughness level.

Finally, a comparative study was conducted according to two guidelines. Firstly, a comparative analysis with the spillway of higher roughness was conducted, in which its energy dissipation efficiency was verified. Secondly, a comparative analysis with the cited references was conducted, in which a consistency of proposals in relation to flow regimes and energy dissipation was verified.

KEYWORDS: Stepped spillway, Energy dissipation, Skimming flow, Converging walls, Small scale model.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v

1. INTRODUÇÃO	1
----------------------------	---

2. ENQUADRAMENTO TEÓRICO DE DESCARREGADORES DE CHEIA	3
---	---

2.1	Introdução	3
2.2	Descarregadores de cheia não convencionais em degraus	6
2.3	Regimes de Escoamento	8
2.3.1	Escoamento em quedas sucessivas (nappe flow)	9
2.3.2	Escoamento deslizante sobre turbilhões (Skimming flow)	11
2.3.3	Escoamento de transição	14
2.4	Arejamento do escoamento em descarregadores de cheia em degraus	18
2.4.1	Ponto de início de Arejamento	20
2.4.2	Concentração de ar no escoamento	21
2.5	Factores de resistência e de dissipação de energia	23
2.5.1	Factores de Resistência	23
2.6	Dissipação de energia	25
2.7	Efeitos de escala	27

3. INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL E EQUIPAMENTO DE MEDIÇÃO	29
--	----

3.1	Descrição da Instalação	29
3.2	Modelo de semelhança utilizado	32
3.3	Equipamento de medição	32
3.3.1	Medição de Caudais	33
3.3.2	Alturas de água	33
3.4	Sistema de aquisição de dados	35
3.5	Calibração de equipamentos	36
3.5.1	Calibração do medidor de caudais	36

3.5.2	Calibração do sistema de flutuador/potenciómetro	37
3.6	Condições de escoamento no trabalho experimental.....	39

4. ANÁLISE DE DADOS E RESULTADOS EXPERIMENTAIS.41

4.1	Noções introdutórias.....	41
4.2	Caracterização do escoamento	41
4.2.1	REGIMES DE ESCOAMENTO	41
4.2.2	Análise comparativa entre o descarregador em estudo e o descarregador de rugosidade elevada, Ferreira(2009)	43
4.2.3	Análise comparativa entre os limites de ocorrência dos regimes de escoamento obtidos experimentalmente e os propostos por diversos autores	44
4.3	Alturas de água	49
4.3.1	Análise comparativa entre o descarregador em estudo e o descarregador de elevada rugosidade, Ferreira (2009)	53
4.4	Velocidades.....	56
4.4.1	Análise comparativa entre o descarregador em estudo e o descarregador com rugosidade elevada, Ferreira (2009)	58
4.5	Dissipação de Energia.....	61
4.5.1	Valores da energia específica em cada degrau do descarregador	61
4.5.2	Análise comparativa entre o descarregador em estudo e o descarregador com rugosidade elevada, Ferreira (2009)	66
4.5.3	Energia total ao longo do descarregador	69
4.5.4	Análise comparativa entre o descarregador em estudo e o descarregador com rugosidade elevada, Ferreira (2009)	72
4.5.5	Análise comparativa entre os valores de dissipação de energia, verificados no presente estudo com os verificados no descarregador de rugosidade elevada, Ferreira (2009)	76
4.5.6	Análise comparativa entre os valores de dissipação de energia obtidos experimentalmente e os propostos pelos diversos autores	82

5. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....87

5.1	Conclusões.....	87
5.2	Desenvolvimentos futuros	89

BIBLIOGRAFIA..... 91

ANEXOS..... 95

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Descarregador de betão armado moldado in-situ (BCC). Fotografia e corte transversal referente à Barragem de Pedrógão. FONTE: INAG	6
Figura 2.2. Descarregadores de cheia em degraus. a) Descarregador em gabiões, b) Descarregador com soleira em degraus não revestida, c) Descarregador de cheias em degraus da barragem de New Croton, EUA.....	7
Figura.2.3.Tipos de escoamento sobre descarregadores em degraus: a) Skimming Flow; b) Transition Flow; c) Nappe Flow. (Dai Prá (2004))	8
Figura 2.4. Escoamento em quedas sucessivas com impacto total do jacto, com formação do ressalto hidráulico na soleira do degrau. Fonte: Ferreira (2009).	9
Figura 2.5. Escoamento em quedas sucessivas com impacto total do jacto, sem formação de ressalto hidráulico na soleira do degrau. Fonte: Ferreira (2009).	9
Figura.2.6. Escoamento em quedas sucessivas com impacto parcial do jacto na soleira do degrau. Fonte: Ferreira (2009).	10
Figura 2.7. Esquema dos tipos de escoamento característicos do escoamento deslizante sobre turbilhões.....	11
Figura 2.8. Recirculação instável com interferência esteira-degrau. Fonte: Chanson (2002) em Simões (2008).	12
Figura 2.9. Recirculação instável com interferência esteira-esteira. Fonte: Chanson (2002) em Simões (2008).	12
Figura 2.10. Recirculação estável. Fonte: Chanson (2002) em Simões (2008)	13
Figura 2.11. Esquema de degrau explicativo do escoamento de transição. Fonte: Simões (2008).....	15
Figura 2.12. Escoamento de transição subtipo TRA1. Fonte: Simões (2008).....	15
Figura 2.13. Escoamento de transição. Subtipo TRA 2. Fonte: Simões (2008).....	16
Figura 2.14. Representação dos limites de escoamento apresentados por Fael (2000), Fael e Pinheiro (2006) e Pinheiro e Fael (2003).	17
Figura 2.15. Representação dos limites de escoamento apresentados por Chanson (2001), Ohtsu et al (2001), Ohtsu (2004) e Chanson and Toombes (2004).	17
Figura 2.16. Escoamento deslizante sobre turbilhões em descarregadores de cheias em degraus, representação esquemática do perfil longitudinal. Fonte: Meireles (2005) (adaptado).	19
Figura 2.17. Escoamento deslizante sobre turbilhões, representação do pormenor do perfil longitudinal e padrão de escoamento secundário na zona turbilhonar. Fonte: Meireles (2005) (adaptado).	19
Figura 2.18. Esquema simplificado de alguns parâmetros que serão abordados neste tópico.	20
Figura 2.19. Factores de resistência de Darcy-Weisbach, segundo diversos autores de acordo com Chanson et al (2002). Fonte: Chanson et al (2002).	24

Figura 2.20. Valores máximos, para cada caudal ensaiado, da dissipação de energia obtidos por Ferreira (2009) para um descarregador de cheias em canal em degraus com elevada rugosidade aparente das paredes.	27
Figura 3.1. Representação da instalação experimental utilizada. Fonte: Figueiredo (2010)	29
Figura 3.2. Reservatório de alimentação da instalação.....	30
Figura 3.3. Reservatório de tranquilização e canal descarregador de cheias em degraus.	30
Figura 3.4. Canal de restituição e reservatório de bombagem.....	30
Figura 3.5. Pormenor do descarregador de cheias em canal, em degraus. a) Vista frontal; b) zona de convergência; c) Vista lateral.	31
Figura 3.6. Medidor de caudais electromagnético utilizado.....	33
Figura 3.7. Tubos piezométricos e tomadas de pressão instalados no descarregador em análise.	34
Figura 3.8. Sistema flutuador/potenciómetro.	34
Figura 3.9. Esquema das variáveis intervenientes no processo de medição das alturas de água, utilizando o corpo flutuador e dispositivo potenciómetro.	35
Figura 3.10. Sistema de aquisição de dados.	36
Figura 3.11. Recta de calibração do dispositivo medidor de caudais.	37
Figura 3.12. Calibração do dispositivo flutuador/potenciómetro, com a aplicação de placas em perspex de diferentes alturas.....	37
Figura 3.13. Pormenor da submergência registada na aplicação do método flutuador/potenciómetro, para um dado regime de escoamento.....	38
Figura 4.1. Regimes de escoamento registados: a) Escoamento em quedas sucessivas; b) Escoamento de transição; c) Escoamento deslizante sobre turbilhões.....	42
Figura 4.2. Esquema representativo dos regimes de escoamento observados ao longo do canal descarregador.....	43
Figura 4.3. Quadro comparativo da análise qualitativa dos regimes de escoamento entre descarregador em degraus convergente com e sem rugosidade.....	44
Figura 4.4. Valores de h_c/H referentes ao modelo ensaiado.	47
Figura 4.5. Limite de ocorrência experimental e linhas limite de ocorrência proposto por Fael (2000).	48
Figura 4.6. Limite de ocorrência experimental e linhas limite de ocorrência proposto por Ohtsu et al (2001).	48
Figura 4.7. Limite de ocorrência experimental e linhas limite de ocorrência proposto por Chanson (2001).	48
Figura 4.8. Limite de ocorrência experimental e linhas limite de ocorrência proposto por Chanson and Toombes (2004).....	49
Figura 4.9. Limite de ocorrência experimental e limite de ocorrência teórico proposto por Fael e Pinheiro (2006).....	49

Figura 4.10. Tomadas de pressão existente no degrau 1 (pormenor superior e tubos piezométricos laterais).....	50
Figura 4.11. Alturas de água registadas experimentalmente para cada caudal ensaiado	51
Figura 4.12. Relação, a, entre as alturas média de água registadas experimentalmente por Ferreira (2009) e as encontradas no presente estudo.	55
Figura 4.13. Relação, a, entre as alturas média de água registadas experimentalmente por Ferreira (2009) e as encontradas no presente estudo	55
Figura 4.14. Velocidades médias registadas, para caudais médios ensaiados referentes a regimes de escoamento maioritariamente EQS/TRA.	57
Figura 4.15. Velocidades médias registadas, para caudais médios ensaiados referentes a regimes de escoamento maioritariamente TRA/EDT.....	57
Figura 4.16. Relação, b, entre as velocidades médias registadas experimentalmente por Ferreira (2009) e as encontradas no presente estudo.....	60
Figura 4.17. Relação, b, entre as velocidades médias registadas experimentalmente por Ferreira (2009) e as encontradas no presente estudo.....	60
Figura 4.18. Esquema representativo das variáveis intervenientes no cálculo da energia específica para EQS. Fonte: Quintela (2001) (adaptado).....	62
Figura 4.19 Esquema representativo das variáveis intervenientes no cálculo da energia específica para EDT. Fonte: Quintela (2001) (adaptado)	62
Figura 4.20. Energia específica registada em cada degrau, para gamas de caudais que apresentem maioritariamente regimes de escoamento EQS/TRA.....	65
Figura 4.21. Energia específica registada em cada degrau, para caudais que apresentem maioritariamente regimes de escoamento TRA/EDT.	65
Figura 4.22 Relação, c, entre a energia específica registada experimentalmente por Ferreira (2009) e as encontradas no presente estudo.	68
Figura 4.23. Relação, c, entre a energia específica registada experimentalmente por Ferreira (2009) e as encontradas no presente estudo.....	68
Figura 4.24. Esquema do descarregador e indicação do plano de referencia considerado.....	69
Figura 4.25. Perfil do descarregador e linhas de energia correspondentes a cada caudal médio ensaiado.....	71
Figura 4.26. Perfil do descarregador e linhas de energia, obtidos por Ferreira (2009), para os caudais 0.25 L/s, 0.82 L/s, 1.24 L/s, 1.69 L/s e 2.17 L/s.....	73
Figura 4.27. Perfil do descarregador e linhas de energia, obtidos por Ferreira (2009), para os caudais 0.50 L/s, 1.05 L/s, 1.49 L/s, 1.92 L/s e 2.32 L/s.....	73
Figura 4.28. Relação, d, entre a energia total registada experimentalmente por Ferreira (2009) e a encontrada no presente estudo.....	75
Figura 4.29 Relação, d, entre a energia total registada experimentalmente por Ferreira (2009) e a encontrada no presente estudo.....	75

Figura 4.30. Relação, e , entre a dissipação de energia registada experimentalmente por Ferreira (2009) e a encontrada no presente estudo.	77
---	----

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1. Características dos tipos de descarregadores (adaptado de Quintela (1990))	4
Quadro 2.2. Síntese dos valores apresentados para f pelas diversas referências bibliográficas apresentadas.	25
Quadro 3.1. Razões de escala (λ) segundo a semelhança de Froude	32
Quadro.3.2 Dados relativos à calibração do medidor de caudais.....	36
Quadro 3.3. Caudal médio, ensaiado no modelo e correspondentes valores no protótipo.....	39
Quadro 4.1. Valores limite de ocorrência dos diversos tipos de escoamento aplicados ao caso em estudo.	45
Quadro 4.2. Valores para a altura crítica da lâmina líquida em cada degrau.	46
Quadro 4.3. Alturas de água referentes ao degrau 1.	50
Quadro 4.4. Valores das alturas médias de água registadas experimentalmente no presente estudo....	51
Quadro 4.5. Alturas médias de água registadas experimentalmente no descarregador de rugosidade elevada, Ferreira (2009).	53
Quadro 4.6. Relação, a , entre as alturas média de água registadas experimentalmente por Ferreira (2009) e as verificadas no presente estudo.....	54
Quadro 4.7. Velocidades médias registadas experimentalmente no presente estudo.....	56
Quadro 4.8 Velocidades médias registadas por Ferreira (2009), U^*	58
Quadro 4.9. Relação, b , entre as velocidades médias registadas experimentalmente por Ferreira (2009) e as encontradas no presente estudo.	59
Quadro 4.10. Energia específica para cada caudal ensaiado, considerando TRA com características semelhantes a EQS.	63
Quadro 4.11. Energia específica para cada caudal ensaiado, considerando TRA com características semelhantes a EDT.....	64
Quadro 4.12. Energia específica, Ep^* , registada experimentalmente por Ferreira (2009).....	66
Quadro 4.13. Relação, c , entre a energia específica registada experimentalmente por Ferreira (2009) e as encontradas no presente estudo.....	67
Quadro 4.14. Energia Total Registada experimentalmente ao longo do descarregador, E [m].	70
Quadro 4.15. Energia total verificada experimentalmente por Ferreira (2009), E^* [m].	72
Quadro 4.16. Relação, d , entre a energia total registada experimentalmente por Ferreira (2009) e a encontrada no presente estudo.....	74
Quadro 4.17. Comparação de dissipação de energia total entre aos dois descarregadores geometricamente semelhantes e com rugosidades diferentes.	76
Quadro 4.18. Comparação entre a dissipação de energia verificada experimentalmente por Ferreira (2009) e os valores obtidos experimentalmente no actual estudo, para os caudais 0.25 L/s e 0.50 L/s.	77

Quadro 4.19. Comparação entre a dissipação de energia verificada experimentalmente por Ferreira (2009) e os valores obtidos experimentalmente no actual estudo, para os caudais 0.83 L/s e 1.05 L/s.	78
Quadro 4.20. Comparação entre a dissipação de energia verificada experimentalmente por Ferreira (2009) e os valores obtidos experimentalmente no actual estudo, para os caudais 1.24 L/s e 1.50 L/s.	79
Quadro 4.21. Comparação entre a dissipação de energia verificada experimentalmente por Ferreira (2009) e os valores obtidos experimentalmente no actual estudo, para os caudais 1.69 L/s e 1.92 L/s.	80
Quadro 4.22. Comparação entre a dissipação de energia verificada experimentalmente por Ferreira (2009) e os valores obtidos experimentalmente no actual estudo, para os caudais 2.19 L/s e 2.29 L/s.	81
Quadro 4.23. Síntese das comparações a efectuar relativamente ao proposto pelas referências e o obtido experimentalmente.	83
Quadro 4.24. Factor de resistência (f) segundo Stephenson, para uma rugosidade aparente de 0.75....	84
Quadro 4.25. Dissipação de energia obtida experimentalmente comparativamente com a esperada segundo os autores referenciados, sendo TRA equiparado a EQS.	85
Quadro 4.26. Dissipação de energia obtida experimentalmente comparativamente com a esperada segundo os autores referenciados, sendo TRA equiparado a EDT.	85

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

ΔEm	Diferença de energia entre a secção de montante e jusante	[m]
$\frac{\Delta E}{Em}$	Dissipação de energia obtida por via experimental no presente estudo	
$\frac{Er}{H_{m\acute{a}x}}$	Dissipação de energia obtida por via experimental, no presente estudo	
$\frac{Er}{H_{m\acute{a}x}}^*$	Dissipação de energia obtida segundo a proposta de André e Ramos para escoamento deslizante sobre turbilhões	
$\frac{\Delta E}{Em}^*$	Dissipação de energia obtida por via experimental por Ferreira (2009)	
$\frac{\Delta E}{Em} 1$	Dissipação de energia estimada segundo proposta de Chanson, para escoamento deslizante sobre turbilhões	
$\frac{\Delta E}{Em} 1^*$	Dissipação de energia estimada segundo proposta de Chanson, para escoamento em quedas sucessivas.	
$\frac{\Delta E}{Em} 2$	Dissipação de energia estimada segundo proposta de Stephenson em EDT	
α_e	Coeficiente de Coriolis	
α	Declive do descarregador	
λ	Parâmetro adimensional: razão de escala protótipo/modelo	
B	Altura entre a soleira do degrau a ser medido e o centro de rotação do potenciômetro	[m]
BCC	Betão compactado por cilindros	
Bi	Largura geométrica do degrau	[m]
$\bar{C}$	Concentração média de ar no escoamento	
C	Concentração de ar no escoamento	
cf	Coeficiente de atrito	
d	Altura do escoamento equivalente num escoamento bifásico (m)	[m]
d/2	Raio do flutuador (m)	[m]
d ₉₀	Altura do escoamento para a qual se verifica uma concentração de ar de 90%	[m]
DH	Diâmetro hidráulico (m)	[m]
Em	Energia máxima disponível a montante	[m]
Ep	Energia específica registada por via experimental no presente estudo	[m]
Ep*	Energia específica registada por via experimental, por Ferreira (2009)	[m]
E	Energia Total obtida por via experimental	[m]
E*	Energia Total obtida por via experimental, por Ferreira (2009)	[m]
Er	Energia residual a jusante	[m]

EDT	Escoamento deslizando sobre turbilhões	
EQS	Escoamento em quedas sucessivas	
EUA	Estados unidos da América	
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto	
Fr	Número de Froude	
Fr*	Número de Froude rugoso	
f	Factor de resistência	
g	Aceleração da gravidade	[m/s ²]
H	Altura geométrica do degrau	[m]
h	Altura de água no escoamento	[m]
h1	Altura conjugada de montante (m)	[m]
h2	Altura conjugada de jusante (m)	[m]
hc	Altura crítica do escoamento (m)	[m]
hm	Altura média de água registada experimentalmente	[m]
hm*	Altura média de água registada experimentalmente por Ferreira (2009)	[m]
hn	Profundidade uniforme do escoamento (m)	[m]
Hdi	Desnível entre duas secções cuja dissipação se pretende calcular	[m]
Hmáx	Energia máxima registada a montante calculada por via teórica	[m]
Hv	Altura da barragem desde a sua crista a um plano de referência, normalmente a sua altura total	[m]
ICOLD	International Commission of Large Dams	
k	Altura de rugosidade ($k = h_d \cos \alpha$)	[m]
K	Coeficiente de Manning – Strickler	[m ^{1/3} /s]
k	Rugosidade média do degrau	[m]
l	Comprimento da vareta do dispositivo de medição	[m]
L	Comprimento geométrico do degrau	[m]
La	Distância longitudinal desde a crista do descarregador ao ponto de início de arejamento do escoamento	[m]
Q	Caudal	[m ³ /s]
Qm	Caudal médio registado experimentalmente	[m]
q _w	Caudal específico	[m ³ /s/m]
RPB	Regulamento de Pequenas Barragens	
S	Área da secção transversal do escoamento	[m ²]
T	Tempo	[s]

TRA	Escoamento de transição	
U	Velocidade média do escoamento obtida no presente estudo.	[m/s]
U*	Velocidade média do escoamento, obtida por Ferreira (2009)	[m/s]
V	Volume	[m ³]
y _a	Profundidade de escoamento no ponto de início de arejamento	[m]
z	Cota geométrica do descarregador, relativa ao plano de referência	[m]

1

INTRODUÇÃO

O presente trabalho surge no âmbito da disciplina Dissertação em Hidráulica do Mestrado Integrado em Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da Faculdade do Porto. O estudo efectuado apresenta-se ao longo de 5 capítulos e constitui a dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de Mestre em Engenharia Civil – Especialização em Hidráulica.

A problemática da ruptura de barragens tem levantado questões importantes no que toca ao dimensionamento e segurança de barragens. Está associada na maioria dos casos a um comportamento inadequado dos respectivos órgãos de segurança, particularmente dos descarregadores de cheia.

O regulamento de segurança em barragens apresenta princípios base de dimensionamento com vista a garantir a segurança da barragem e dos órgãos, associando o máximo de economia. Contudo levantou questões relativamente às obras já existentes, levando à necessidade de intervenções de manutenção e até mesmo de reforço de capacidade de descarga.

Destas novas exigências surgiram nas últimas décadas estudos sobre novas soluções de concepção de descarregadores de cheia mais económicas, que fazem frente às soluções tradicionais que apresentam custos relativamente elevados, como as galerias ao nível da fundação ou os canais implantados nas encostas, são os chamados descarregadores de cheia não convencionais.

Este tipo de problemáticas em barragens de aterro, o regulamento é bastante mais restrito no que respeita aos parâmetros de dimensionamento, na medida em que este tipo de obra é muito mais sensível a problemas que conduzem à ruptura da barragem, como é o caso de assentamentos diferenciais ou erosão interna da estrutura da barragem.

É de enorme importância explorar soluções de descarregadores não convencionais, economicamente mais viáveis e com melhores desempenhos a nível ambiental, que permitam, juntamente com os estudos efectuados até a data, criar confiança por parte das entidades reguladoras.

O presente trabalho, tem como objectivo estudar um descarregador de cheias em canal não convencional em betão, em modelo reduzido, em condições de funcionamento semelhantes às do protótipo e proceder a posterior comparação com outros descarregadores de cheia em canal não convencionais em degraus. Pretende-se assim contribuir para a utilização fundamentada deste tipo de dispositivos.

Numa primeira abordagem ao tema procedeu-se a uma pesquisa bibliográfica sobre o assunto para posterior trabalho experimental desenvolvido no Laboratório de Hidráulica da Faculdade de Engenharia, onde o modelo e instalação já se encontravam disponíveis.

Foram ensaiados diversos caudais e registadas as características do escoamento em cada um deles, nomeadamente no que toca a regime de escoamentos e alturas médias de água ao longo do descarregador. Com os dados recolhidos foi possível calcular a dissipação de energia originada neste tipo de descarregador, e proceder à comparação dos valores obtidos com os anteriormente registados num descarregador idêntico em dimensões, mas com paredes de elevada rugosidade e com valores de dissipação de energia teoricamente obtidos, utilizando expressões sugeridas por vários autores.

A presente dissertação é composta por cinco capítulos, cujo conteúdo sucintamente se apresenta.

No primeiro capítulo apresenta-se o enquadramento do tema, referem-se os objectivos a atingir e, de forma resumida, descreve-se o trabalho desenvolvido.

O segundo capítulo é dedicado ao enquadramento teórico e a fundamentação do presente estudo.

A descrição completa da instalação experimental assim como os processos utilizados no desenvolvimento do trabalho realizado é discutida no terceiro capítulo.

No quarto capítulo são apresentados os resultados obtidos e a respectiva análise crítica.

Por fim, no quinto capítulo são apresentadas as conclusões deste estudo e são sugeridos possíveis desenvolvimentos.

2

ENQUADRAMENTO TEÓRICO DE DESCARREGADORES DE CHEIA

2.1 INTRODUÇÃO

Os descarregadores de cheias são órgãos de grande importância na constituição das obras hidráulicas, seja por motivos de segurança, seja por razões económicas.

O regulamento de Segurança de Barragens, art.14, nº3, refere que “os descarregadores de cheia devem ser aptos a escoar em qualquer circunstância a cheia de projecto sem necessidade de auxílio das descargas de fundo, tomadas de água ou outros dispositivos”. Contudo, para além da função regulamentar é necessário que a descarga seja feita sem pôr em causa a segurança estrutural e que não despreste os níveis máximos a montante no aproveitamento.

O objectivo pretendido com a construção de dispositivos descarregadores de caudais de cheia é fazer com que a restituição a jusante seja feita em condições que permitam que o escoamento tenha características mais aproximadas quanto possível ao regime natural do rio. Com a construção da obra hidráulica, a altura de água a montante eleva-se fazendo com que exista um desnível, entre as duas superfícies da água a montante e jusante dessa mesma obra, que se traduz numa diferença de carga de valor considerável. Em descarregadores de soleira normal, a perda de carga é muito pouco significativa ao longo da soleira descarregadora, levando a que a restituição de água a jusante origine escoamentos com energias elevadas, normalmente muito superiores às registadas no escoamento natural. Sendo assim, para fazer face a esta situação é necessário criar soluções capazes de dissipar essa energia eficazmente.

A dissipação de energia pode ser conseguida por diversas formas: na própria soleira descarregadora ou a jusante da mesma, nomeadamente por atrito entre as fronteiras e o escoamento, por turbulência no escoamento, por atrito e emulsão de jactos com o ar ou por impacto e atrito de jactos com a lâmina de água a jusante. Existem várias soluções recorrentemente adoptadas a jusante do canal descarregador como bacias de dissipação de energia por ressalto hidráulico, bacias de dissipação de energia por trampolim submerso, bacias de dissipação de energia por jactos, entre outros. É de ter em atenção que este tipo de soluções conduz a escoamentos com turbulência muito elevada, que pode eventualmente ocasionar problemas como vibrações, fossas de erosão no próprio leito, podendo pôr em causa a segurança das obras hidráulicas.

Quintela (1990) sugere que a classificação deste tipo de descarregadores seja feita segundo dois aspectos:

- i. quanto à localização e controlo do caudal;
- ii. quanto ao guiamento da lâmina líquida e ao modo de dissipação de energia.

No Quadro 2.1 encontram-se os principais tipos e características usualmente utilizadas para classificação dos dispositivos descarregadores de cheia. De notar que algumas destas soluções, quer

por razões construtivas quer por razões de índole económica, não tem sido alvo de escolha por parte das equipas projectistas.

Quadro 2.1. Características dos tipos de descarregadores (adaptado de Quintela (1990))

Critério	Classificação	Aplicabilidade	Controlo do Escoamento
(A) Localização e controlo do escoamento	A.1. Sobre a barragem	Barragens de Betão Barragens de aterro (descarregadores não convencionais)	Descarga livre, por sifão ou controlada por comporta Descarga livre
	A.2. Orifícios através da barragem	Barragens de betão	Descarga controlada por comportas
	A.3. Canal de encosta	Barragem de qualquer tipo. Independente da estrutura da barragem	Descarga livre ou controlada por comportas
	A.4. Poço, vertical ou inclinado	Barragem de terra ou enrocamento (poço, seguido de galeria sob a barragem) Barragem de qualquer tipo (galeria escavada)	Descarga livre ou controlada por comportas
	A.5. Fusível	Qualquer barragem (de emergência, lateral a barragem)	Descarga livre
(B) Guiamento da lâmina líquida e dissipação	B.1. Queda livre e dissipação de energia no leito	Com e sem protecção do leito, com ou sem sobrelevação do nível natural do rio. Localização e controlo segundo A.1. e A.2.	
	B.2. Queda guiada e trampolim de saída com dissipação no leito	Com e sem protecção do leito, com ou sem sobrelevação do nível natural do rio. Localização e controlo segundo A.1, A.2., A.3. e A.4.	
	B.3. Queda guiada e obra de dissipação de energia	Localização e controlo segundo A.1, A.2., A.3. e A.4.	

A escolha do tipo de dispositivo de dissipação a adoptar está dependente de factores como a fiabilidade da solução, o tipo de barragem a que vai pertencer, a topografia e características

geotécnicas do terreno, o ciclo hidrológico do curso de água e os caudais a descarregar. É de ter em conta que, nesta escolha, devem ser ponderadas todas as variáveis e soluções existentes para uma boa compatibilização entre solução e custo total da obra. Segundo Custódio (2009), dentro dos tipos de soluções clássicas mais correntes, como é o caso de canais implantados em encostas ou galerias ao nível da fundação, podemos ter custos na ordem dos 20% a 30% do orçamento total da barragem, sendo que, no caso de pequenas barragens de aterro (10 – 12 m acima da fundação), o custo relativo do descarregador poderá chegar a 50% do custo total da barragem. Como tal, têm vindo a ser estudadas soluções mais viáveis, tanto na construção como na reabilitação de barragens já existentes.

As barragens de aterro são as mais problemáticas no que toca a dispositivos de descarga de caudais de cheia, como condutas sob o corpo da barragem, pois estes podem provocar problemas de segurança para o descarregador e para a barragem. Assentamentos diferenciais, próprios deste tipo de barragens, ao longo da vida da obra, podem originar deformações e fissuras na conduta, resultando na passagem da água do corpo da barragem para a conduta ou da conduta para o corpo da barragem, podendo provocar igualmente erosão interna no próprio material da barragem. Estes tipos de problemas fazem com que soluções ditas tradicionais de órgãos de dissipação de energia não sejam adoptadas ou exijam especiais cuidados quando decidida a sua utilização.

Em Portugal, o Regulamento de Segurança de Pequenas Barragens (RPB) aplicado a barragens com altura inferior ou igual a 15 m e com capacidade inferior a 100.000 m³, estabelece princípios e critérios gerais de projecto de barragens, numa perspectiva de garantir a segurança das obras com o máximo de economia. No art.10, nº4 refere que “o descarregador não pode ficar fundado no corpo da barragem”, visando assim evitar problemas associados a uma má aplicação da solução e levando a problemas de assentamentos diferenciados que podem pôr em causa a segurança estrutural da barragem. É necessário, nesta medida, estudar o máximo de casos possíveis tentando com isto que tais soluções se tornem cada vez mais viáveis e com capacidade de integrar um regulamento que possibilite a utilização por grande número de técnicos com classificação diferenciada.

Com vista a solucionar as dificuldades construtivas e reduzir, consequentemente, os custos associados às estruturas de dissipação na construção de barragens de aterro, aparecem os chamados descarregadores não convencionais. Segundo ICOLD (1994), o estudo de descarregadores não convencionais pode ser regido segundo duas linhas fundamentais:

- Utilização de túneis ou canais com soleira não revestida, apresentando rugosidade elevada;
- Construção de descarregadores em degraus.

Estes tipos de soluções preconizam a dissipação de energia do escoamento ao longo da soleira descarregadora, o que faz com que os custos associados a obras de dissipação a jusante do canal de descarga sejam significativamente inferiores e, muitas vezes, seja desnecessário a sua aplicação na estrutura hidráulica em dimensionamento.

O presente trabalho surge do proposto pela ICOLD (1994), onde será feito o estudo de um descarregador em degraus com troço inicial convergente. As linhas orientadoras e dados recolhidos no presente trabalho terão como fim uma posterior comparação com o estudo relativo a um descarregador com geometria semelhante mas com soleira não revestida, apresentando assim rugosidade superior. Serão também efectuadas comparações, sempre que pertinentes, com outros estudos referenciados ao longo do trabalho.

Problemas hidráulicos especiais, nomeadamente onda estacionária de frente abrupta, emulsão de ar, cavitação e abrasão, resultantes das altas velocidades verificadas em descargas de caudais de cheia, não serão estudados no presente trabalho, contudo são problemas que devem ser tidos em

consideração pela sua importância no âmbito da segurança e dimensionamento de estruturas hidráulicas, e como tal no presente capítulo serão feitas algumas referencias a estudos efectuados nestas temáticas.

2.2 DESCARREGADORES DE CHEIA NÃO CONVENCIONAIS EM DEGRAUS

Os descarregadores de degraus aparecem da necessidade de minimizar o custo de obras de dissipação, uma vez que a dissipação de energia é feita, em grande parte, na própria soleira descarregadora. É um tipo de descarregador não convencional com vista a promover o máximo de dissipação de energia ao longo do canal. Segundo a classificação apresentada no Quadro 2.1, este tipo de descarregadores enquadram-se no tipo (A3, B3) com possibilidade de ter a soleira revestida ou não revestida.

Existem 4 tipos possíveis de descarregadores não convencionais nomeadamente:

- Descarregadores em betão armado moldado in-situ (BCC);
- Descarregadores de gabiões com soleira em degraus;
- Descarregadores de blocos de betão pré-fabricados com soleira em degraus;
- Descarregadores sobre terra armada.

A utilização deste tipo de descarregadores tem sido cada vez mais recorrente, pelo grande interesse por parte dos projectistas em pôr em prática novas soluções construtivas conduzam a redução de custos, melhorias de estabilidade e consequentes melhorias de segurança assim como uma considerável mitigação do impacto visual.

Nas Figura 2.1 e Figura 2.2 a), b) e c) é possível visualizar algumas barragens que adoptaram este tipo de soluções.

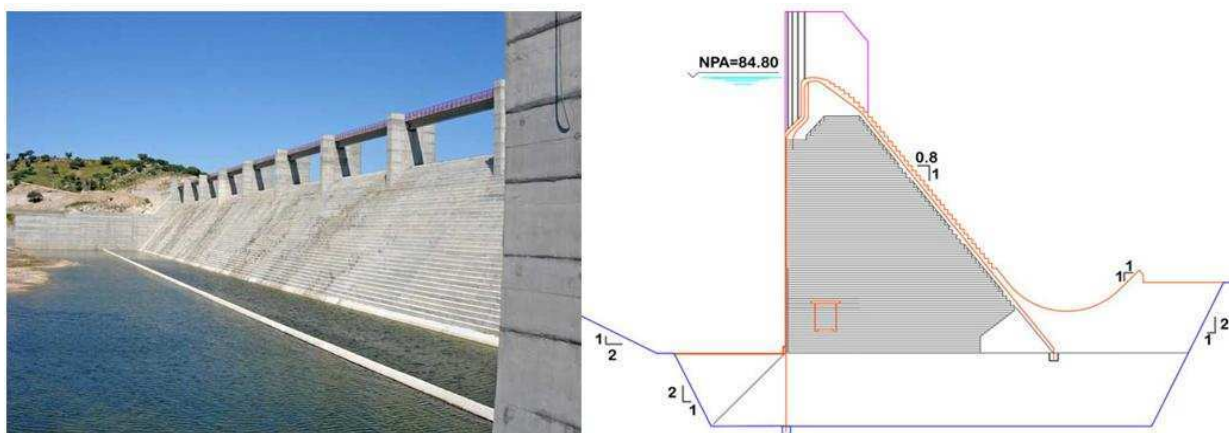
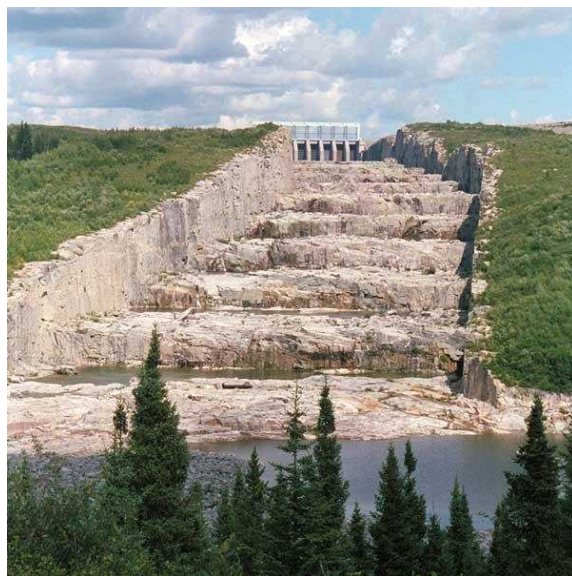


Figura 2.1. Descarregador de betão armado moldado in-situ (BCC). Fotografia e corte transversal referente à Barragem de Pedrógão. FONTE: INAG

a)



b)



c)



Figura 2.2. Descarregadores de cheia em degraus. a) Descarregador em gabiões, b) Descarregador com soleira em degraus não revestida, c) Descarregador de cheias em degraus da barragem de New Croton, EUA

2.3 REGIMES DE ESCOAMENTO

O tipo de escoamento que ocorre num descarregador em canal em degraus é função do caudal e da geometria dos degraus. O estudo do escoamento neste tipo de descarregadores tem sido alvo de diversos estudos por parte de diversas entidades com interesse na área, com a finalidade de definir as suas características e otimizar o seu dimensionamento.

Actualmente são aceites 3 tipos de escoamento em descarregadores de degraus (Figura.2.3)

- Escoamento em quedas sucessivas (nappe flow) **EQS**;
- Escoamento de transição (transition flow) **TRA**;
- Escoamento deslizante sobre turbilhões (Skimming flow) **EDT**.

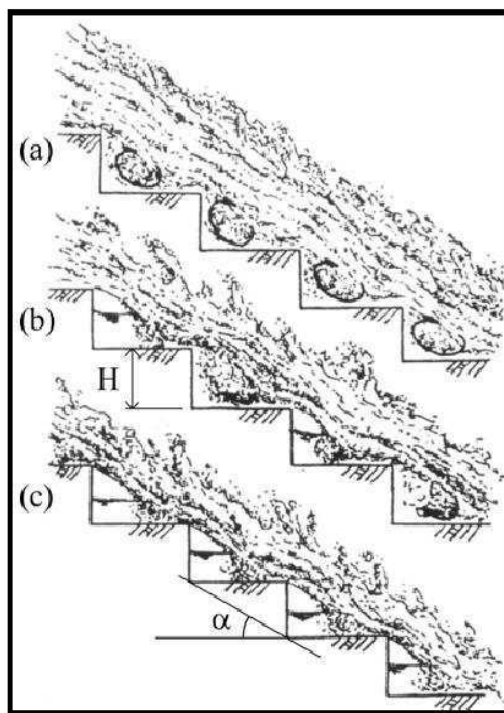


Figura.2.3. Tipos de escoamento sobre descarregadores em degraus: a) Skimming Flow; b) Transition Flow; c) Nappe Flow. (Dai Prá (2004))

A designação referente aos regimes de escoamento característicos de descarregadores em degraus (nappe flow e skimming flow) foi atribuída por Horner (1969). Durante anos os dois tipos de escoamento foram estudados por diversos autores sem entrarem em consideração com a existência de um regime intermédio. O escoamento intermédio ou de transição foi apresentado pela primeira vez por Ohtsu e Yasuda (1997).

Matos e Quintela (1995) procederam à tradução da designação inglesa dos regimes de escoamento (skimming flow e nappe flow). Outra forma de designação para os regimes é a abreviada. Foi adoptada por Ferreira (2009) e encontra-se a negrito na lista anterior.

Nas subsecções seguintes será adoptada qualquer uma das designações para os regimes de escoamento apresentados, tentando contudo adoptar principalmente a designação portuguesa ou abreviada, e será feita referência aos estudos dos tipos de escoamento encontrados até a data, nomeadamente no que diz respeito a características e limites de ocorrência dos diferentes tipos.

2.3.1 ESCOAMENTO EM QUEDAS SUCESSIVAS (NAPPE FLOW)

Neste tipo de escoamento a dissipação de energia é feita para pequenos declives com caudais reduzidos e ocorre ou através do impacto do jacto no degrau ou no ar, ou através da formação de ressalto hidráulico. É caracterizado pela formação em cada degrau de uma lâmina líquida que atinge total ou parcialmente o degrau seguinte, podendo ainda verificar-se a formação de uma bolsa de ar sob a lâmina líquida. Meireles (2005) refere-se ao escoamento em quedas sucessivas como sendo caracterizado por uma sucessão de quedas de degrau para degrau. Baseado em autores como, Matos e Quintela (1995), Chanson (1994), e Ferreira (2009), apresenta-se a proposta de divisão deste tipo de regime de escoamento em 3 subtipos:

- (NA1) Escoamento em quedas sucessivas com impacto total do jacto, com formação do ressalto hidráulico na soleira do degrau (isolated nappe flow with fully developed hydraulic jump);

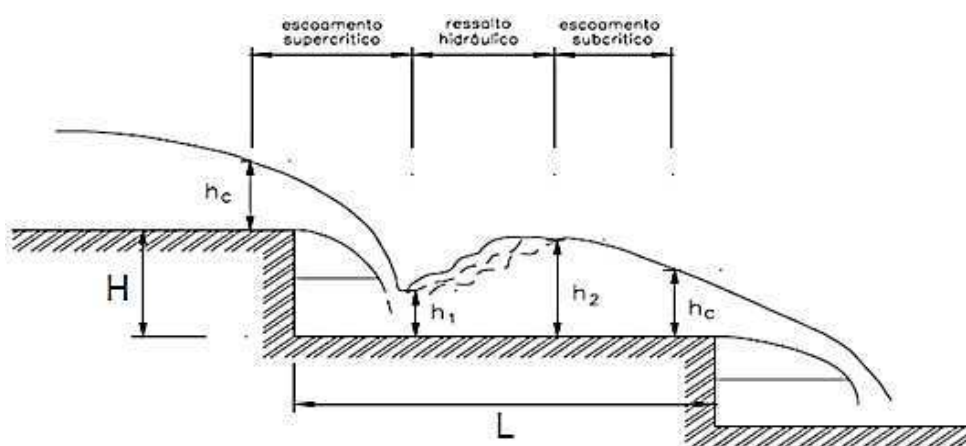


Figura 2.4. Escoamento em quedas sucessivas com impacto total do jacto, com formação do ressalto hidráulico na soleira do degrau. Fonte: Ferreira (2009).

- (NA2) Escoamento em quedas sucessivas, com impacto total do jacto, sem formação de ressalto hidráulico na soleira do degrau (isolate nappe flow with partially developed hydraulic jump);

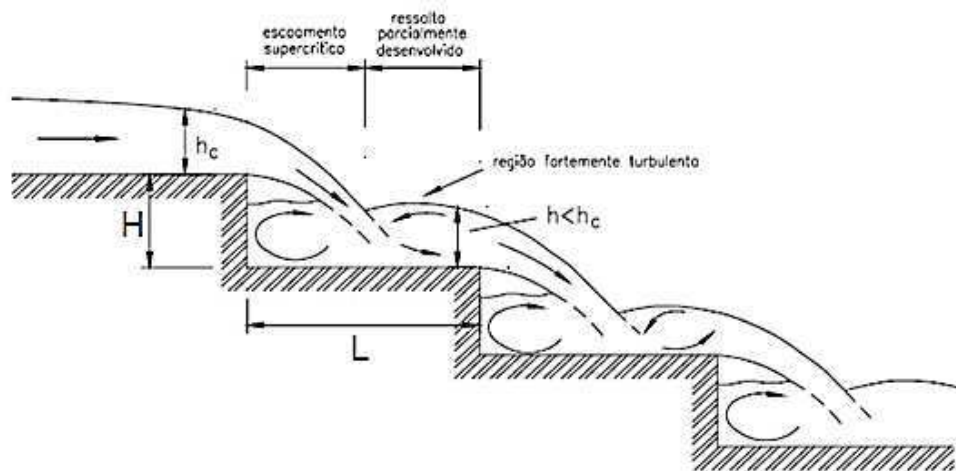


Figura 2.5. Escoamento em quedas sucessivas com impacto total do jacto, sem formação de ressalto hidráulico na soleira do degrau. Fonte: Ferreira (2009).

- (NA3) Escoamento em quedas sucessivas, com impacto parcial do jacto na soleira do degrau (partial nappe flow ou nappe interference flow podendo ainda ser chamado de nappe flow without hydraulic jump).

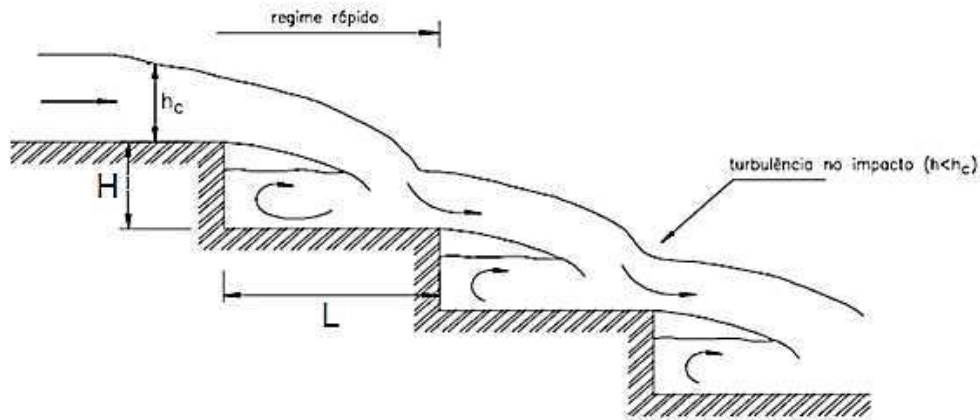


Figura.2.6. Escoamento em quedas sucessivas com impacto parcial do jacto na soleira do degrau. Fonte: Ferreira (2009).

Nas Figura 2.4, Figura 2.5 e Figura.2.6 as variáveis L e H correspondem respectivamente ao comprimento e altura geométrica do degrau em análise, h representam a altura de água no escoamento, h_c a altura crítica do escoamento na secção em causa e h_1 e h_2 as alturas conjugadas do ressalto hidráulico formado pelo impacto total do jacto no degrau.

Chanson (1994) define o limite de ocorrência de escoamento em quedas sucessivas com formação de ressalto hidráulico através da relação, h_c/H (expressão (2.1)), desde que H/L se encontre entre 0.2 e 0.6.

$$\frac{h_c}{H} \leq 0.0916 * \left(\frac{H}{L}\right)^{-1.276} \quad (2.1)$$

Na expressão h_c representa a altura crítica do escoamento, L e H são as características geométricas do degrau, respectivamente comprimento e altura. Fael (2000) adoptou na sua investigação a mesma expressão (2.1), contudo admite a existência de uma zona de transição.

Otshu et al. (2001) para inclinações entre 5° a 55° sugerem como referência para o início de escoamento de quedas sucessivas a expressão:

$$\frac{H}{h_c} = 0.57 * \tan(\alpha)^3 + 1.3 \quad (2.2)$$

Fael e Pinheiro (2003) definem um limite de ocorrência mais específico, comparativamente aos restantes autores. A expressão (2.3) representa o limite de ocorrência de escoamento em quedas sucessivas com impacto total do jacto, desde que H/L apresente valores entre 0.2 e 0.5:

$$\frac{h_c}{H} \leq 0.125 * \left(\frac{H}{L}\right)^{-1.313} \quad (2.3)$$

Simões (2008) faz referência a alguns estudos sobre limites de ocorrência de escoamento em quedas sucessivas entre eles destaca-se a proposta de Chanson (2001). O autor propôs um novo limite de ocorrência para este tipo de escoamento, caracterizado pela expressão (2.4), pois no estudo anterior (Chanson (1994)) não tinha considerado o facto de existir um regime de transição.

$$\frac{hc}{H} = 0.89 - 0.4 * \frac{H}{L} \quad (2.4)$$

Fael e Pinheiro (2006) são citados por Ferreira (2009), apresentam um limite um pouco diferente dos anteriores. Contudo, segue aproximadamente a mesma lei apresentada pelos referidos autores em estudos anteriores.

$$\frac{hc}{H} = 0.279 * \left(\frac{H}{L}\right)^{-0.828} \quad (2.5)$$

2.3.2 ESCOAMENTO DESLIZANTE SOBRE TURBILHÕES (SKIMMING FLOW)

De acordo com Lencastre (2001), o escoamento deslizante sobre turbilhões processa-se em regime quase uniforme para caudais mais elevados. O mesmo autor compara o escoamento da massa fluida ao verificado para um escoamento em canal rugoso.

O escoamento sobre turbilhões compreende dois tipos distintos de escoamento, o escoamento principal e o escoamento secundário. Meireles (2005) classifica como escoamento principal o que ocorre sobre a soleira fictícia do canal ou pseudo-fundo, sendo o pseudo-fundo a zona definida pela envolvente das extremidades dos degraus. O escoamento secundário é classificado pelo mesmo autor como sendo o escoamento que ocorre sob a soleira fictícia, isto é, no interior da cavidade delimitada pelo escoamento principal e os degraus. Por outro lado, Simões (2008) refere que o escoamento rotacional que ocorre na cavidade acima descrita é mantido pela tensão de corte do escoamento principal, processo no qual é dissipada a maior parte de energia cinética do escoamento.

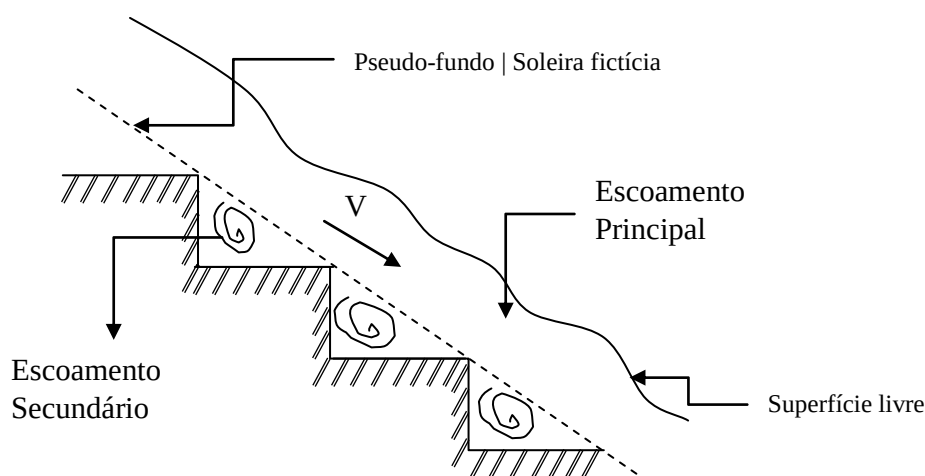


Figura 2.7. Esquema dos tipos de escoamento característicos do escoamento deslizante sobre turbilhões.

Chanson (sendo exemplo 1994, 1995, 2000, 2002) tem desenvolvido estudos acerca do tema e tem sido alvo de referência por parte de vários autores, referenciados ao longo do trabalho. O autor desde 1994 que propõe uma subdivisão do regime skimming flow, com base na análise da estabilidade dos vórtices abaixo do pseudo-fundo, em 3 tipos:

- (SK1) Escoamento com recirculação instável com interferência esteira¹-degrau

Verifica-se uma certa ondulação da superfície livre. Ocorre em paramentos com menor inclinação, onde a altura do degrau é pequena face a sua extensão. Este tipo de situação impossibilita a formação de vórtices estáveis, o que leva a formação de esteiras tridimensionais instáveis. As esteiras actuam isoladamente em cada degrau, criam forças de corte e arrastamento pela interferência esteira-degrau.

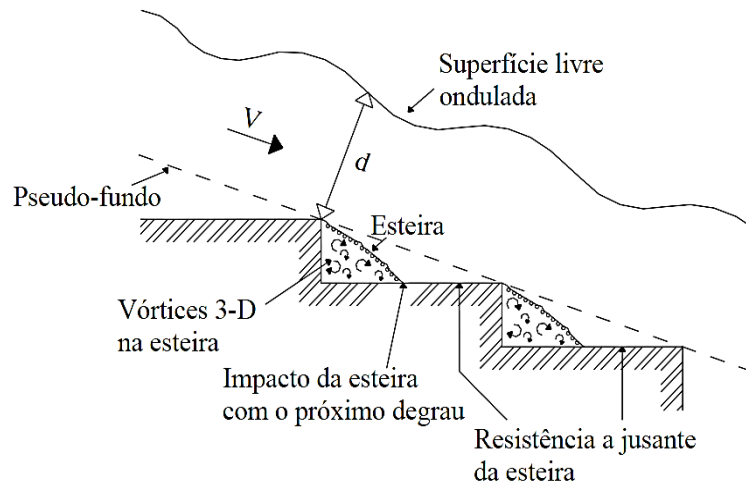


Figura 2.8. Recirculação instável com interferência esteira-degrau. Fonte: Chanson (2002) em Simões (2008).

- (SK2) Escoamento com recirculação instável com interferência esteira-esteira

Neste caso a superfície livre apresenta-se menos ondulada. Verifica-se para maiores inclinações com paramentos menos alongados (valores de referência $15^\circ \leq \alpha \leq 25^\circ$). A esteira começa a interferir no degrau seguinte fazendo com que as forças de corte sejam muito pequenas.

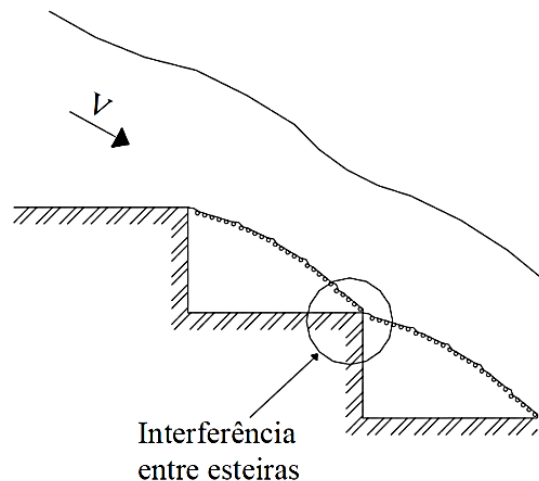


Figura 2.9. Recirculação instável com interferência esteira-esteira. Fonte: Chanson (2002) em Simões (2008).

¹ Esteira, a superfície que divide o escoamento rotacional entre degraus e o escoamento principal

- (SK3) Escoamento com recirculação estável

Para este escoamento, a superfície livre não apresenta ondulações. O escoamento origina formação de grandes vórtices bidimensionais que se localizam no pseudo-fundo. A resistência oferecida ao escoamento principal é dependente da energia utilizada para manter o escoamento rotacional, sendo este o principal fenómeno de dissipação de energia.

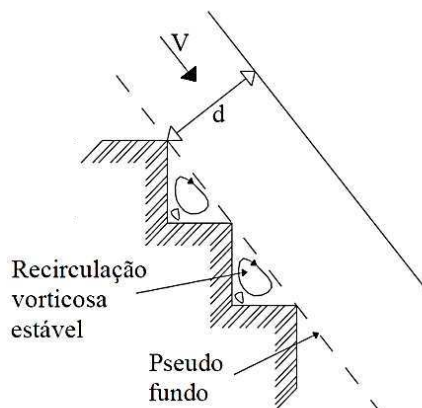


Figura 2.10. Recirculação estável. Fonte: Chanson (2002) em Simões (2008)

Fael (2000) para inclinações entre 11.3° e 26.6° relaciona a posição de início de escoamento sobre turbilhões com hc/H , apresentando a expressão (2.6).

$$\frac{hc}{H} = 0.824 * \left(\frac{H}{L}\right)^{-0.277} \quad (2.6)$$

Otshu et al. (2001) para inclinações entre 5° a 55° sugerem como referência para o início de escoamento sobre turbilhões a expressão (2.7).

$$\frac{hc}{H} = \left(0.57 * \left(\frac{H}{L}\right)^3\right)^{-1} \quad (2.7)$$

Chanson (2001), após entrar em conta com a existencia de um regime de escoamento transitório, apresenta a expressão (2.8) como sendo limite apartir do qual se verifica escoamento deslizante sobre turbilhões.

$$\frac{hc}{H} = 1.2 - 0.325 * \left(\frac{H}{L}\right) \quad (2.8)$$

Otshu et al (2004) estudaram o regime de escoamento deslizante sobre turbilhões para diferentes inclinações de canal (α), nomeadamente entre 5,7 e 55°. Segundo os autores, a mudança de inclinação do canal alterava a relação H/hc assim como as características do escoamento. Para inclinações superiores a 19° constataram que o perfil de superfície livre na região de escoamento quase uniforme é independente da relação H/hc e praticamente paralelo ao pseudo-fundo - Perfil tipo A. Para as inclinações mais pequenas, a superfície livre apresentava configuração e comportamento diferente, , nem sempre se mantinha paralela ao pseudo-fundo - perfil tipo B. Com o crescimento da relação H/hc o perfil apresentava profundidades dependentes da posição onde a medição era efectuada ao longo do degrau.

A comparação entre as classificações de Chanson (2002) e Otshu et al (2004) é efectuada por Gonzales e Chanson (2007) e referida em Simões (2008) sendo que:

- Perfil tipo A corresponde ao escoamento com recirculação instável com interferência esteira-degrau (SK1);
- Perfil tipo B corresponde ao escoamento com recirculação instável com interferência esteira-esteira (SK2).

O limite de ocorrência entre estes dois sub-regimes pode ser expresso pela expressão (2.9) válida para α entre 5.7° e 19°.

$$\frac{H}{hc} = 13 * \left(\frac{H}{L}\right)^2 - 2.73 * \left(\frac{H}{L}\right) + 0.373 \quad (2.9)$$

Como anteriormente referido, Ferreira (2009) apresenta um estudo efectuado por Fael e Pinheiro (2006), no qual os autores definem o limite de passagem para regime deslizante como turbilhões baseando-se numa lei potencial. O limite é dado pela expressão (2.10)::

$$\frac{hc}{H} = 0.580 * \left(\frac{H}{L}\right)^{-0.506} \quad (2.10)$$

2.3.3 ESCOAMENTO DE TRANSIÇÃO

Este regime de escoamento situa-se entre o escoamento de quedas sucessivas e o escoamento deslizante sobre turbilhões. Acidentes atribuídos a este regime de escoamento ocorridos nas barragens de Arizona Canal em 1905 e New Croton em 1955 (Chanson 2002) contribuíram para a inclusão do estudo deste regime de escoamento nos descarregadores em canal em degraus. Segundo o autor as barragens trabalhavam sob um regime de transição. Este acredita que as causas de ruptura se devem essencialmente às características instáveis deste tipo de escoamento, as quais têm associadas flutuações de pressão e esforços adicionais aplicados à estrutura, que por sua vez conduzem à fadiga dos materiais.

Chanson (2002) faz ainda algumas referências às características do escoamento que podem ser verificadas visualmente. Segundo o autor, este tipo de escoamento, ao contrário do escoamento deslizante sobre turbilhões, não apresenta uma superfície com muitas ondulações, nem uma sucessão de jactos, como acontece no escoamento em quedas sucessivas. O escoamento ao longo dos degraus é caracterizado por uma massa de água que circula de degrau para degrau, com formação de uma pequena cavidade de ar perto da parte superior do degrau. Existe também uma zona onde é evidente a formação de salpicos e uma certa agitação da lâmina líquida. Essa zona ocorre a jusante do ponto de estagnação, ponto que separa o escoamento rotacional e a zona de salpicos. Chanson (2002) concluiu também que para este tipo de escoamento, a altura de água atinge valores inferiores ao crítico ao longo do degrau. As características deste tipo de escoamento são muito variáveis de degrau para degrau, conduzindo a que as condições de escoamento ao longo do canal também o sejam.

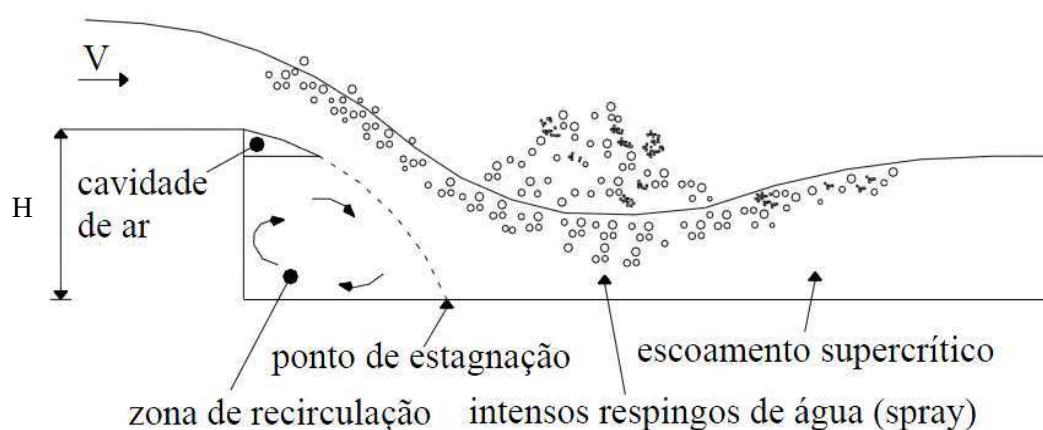


Figura 2.11. Esquema de degraú explicativo do escoamento de transição. Fonte: Simões (2008)

Ohtsu e Yasuda (1997) foram os primeiros a definir o conceito de escoamento de transição, contudo não definiram as propriedades do escoamento. Chanson (2002) publicou um artigo no qual apresentou as propriedades do referido escoamento. Conseguiu ainda descrever a concentração de ar, a velocidade e contabilizar as bolhas de água resultantes do emulsão de ar no escoamento, permitindo caracterizar o escoamento ao longo do canal em degraus.

Chanson and Toombes (2004) classificam o escoamento de transição como o escoamento intermédio entre o escoamento de quedas sucessivas, característico de pequenos caudais, e o escoamento deslizante sobre turbilhões que se verifica para grandes caudais de descarga. O escoamento é caracterizado pelos autores como sendo um escoamento caótico, associado a um intensos salpicos. Com base em ensaios realizados, dividiram o escoamento em dois subtipos TRA1 e TRA2:

- TRA1: os autores observam que a jusante do ponto de início de arejamento ocorrem cavidades de ar de tamanho variável e forma irregular;

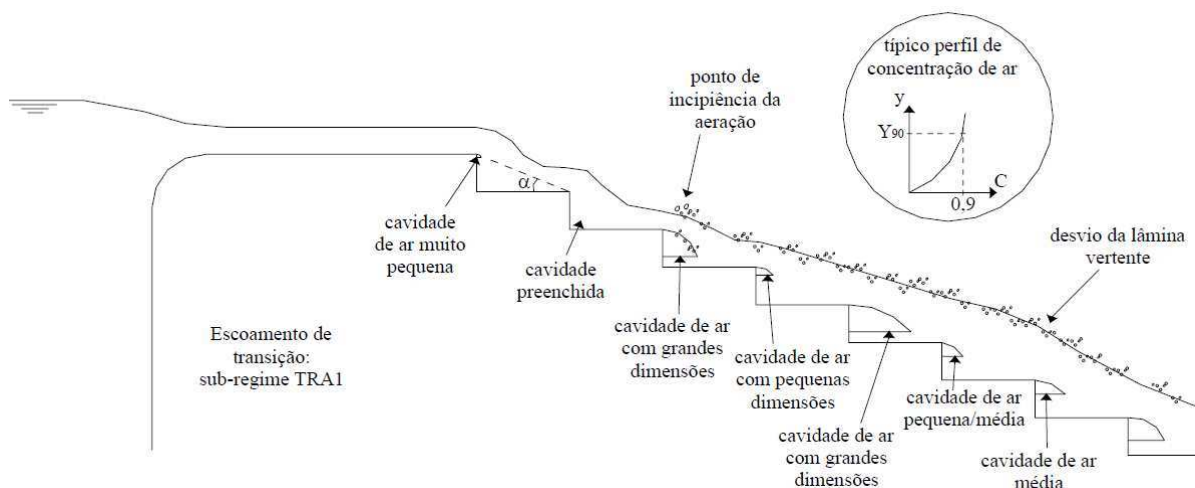


Figura 2.12. Escoamento de transição subtipo TRA1. Fonte: Simões (2008)

- TRA2: as mesmas variações verificadas para o sub-regime anteriormente definido também se verificam. Contudo observam-se cavidades totalmente preenchidas. Os autores chegaram à conclusão que o perfil de concentração de ar neste tipo de escoamento é muito semelhante ao verificado para o escoamento deslizante sobre turbilhões.

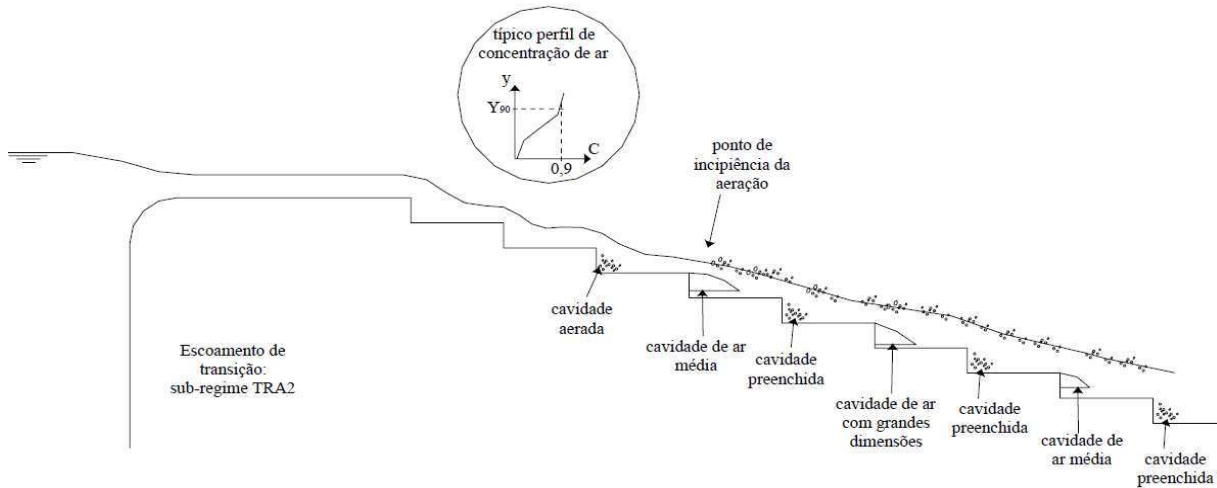


Figura 2.13. Escoamento de transição. Subtipo TRA 2. Fonte: Simões (2008)

O estudo efectuado pelos mesmos autores permitiu concluir que o escoamento de transição pode ser enquadrado numa área definida por um limite superior e inferior. O limite inferior dado pela expressão (2.11) é caracterizado por cavidades de ar irregulares na maior parte dos degraus associado a uma distribuição linear de concentração de ar.

$$\frac{hc}{h} > 0,9174 - 0,381 * \frac{h}{Bi} \quad \text{Limite inferior } [0 < \frac{h}{Bi} < 1,7] \quad (2.11)$$

O limite superior dado pela expressão (2.12) é caracterizado por cavidades de ar nos degraus praticamente preenchidas e a concentração de ar no escoamento aproxima-se muito da apresentada para o escoamento deslizante sobre turbilhões.

$$\frac{hc}{h} < \frac{0,9821}{(\frac{h}{Bi} + 0,388)^{0,384}} \quad \text{Limite Superior } [0 < \frac{h}{Bi} < 1,5] \quad (2.12)$$

Para os dois limites acima propostos as variáveis hc , h e Bi representam respectivamente a altura de água crítica do escoamento, a altura de água registada e a largura do degrau em análise no local da medição.

A Figura 2.14 e Figura 2.15 retrata os diversos limites de ocorrência dos regimes de escoamento apresentados anteriormente, de forma a tornar-se mais evidente as considerações dos diversos autores no que respeita à existência de três tipos distintos de escoamento, dependentes das características dos degraus e da altura crítica estando intimamente associado a esta, o caudal escoado ao longo do canal.

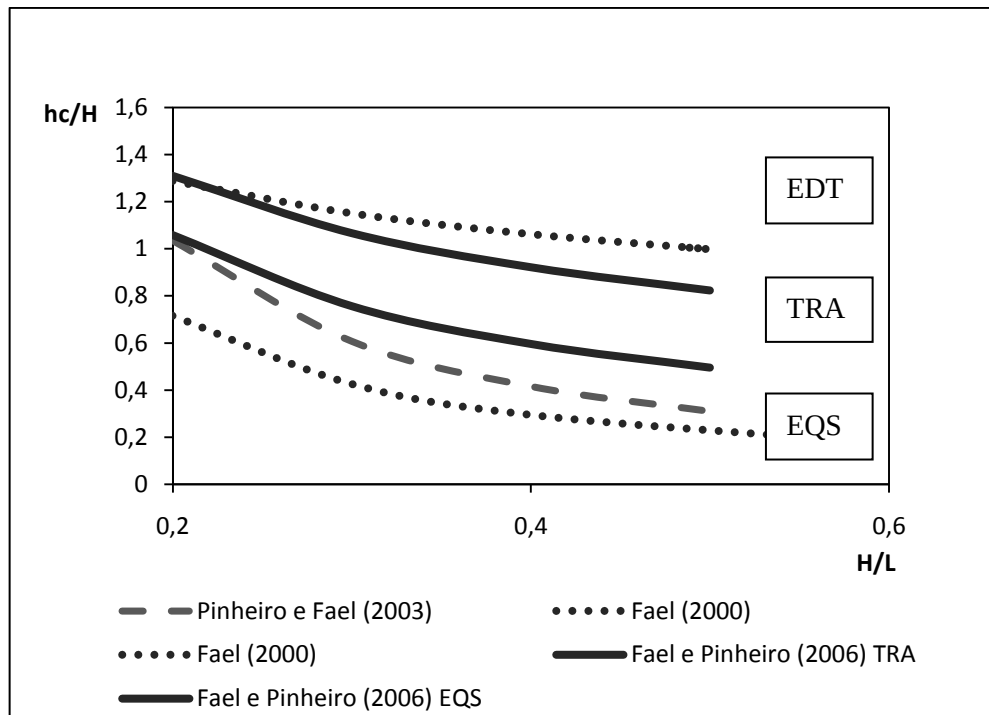


Figura 2.14. Representação dos limites de escoamento apresentados por Fael (2000), Fael e Pinheiro (2006) e Pinheiro e Fael (2003).

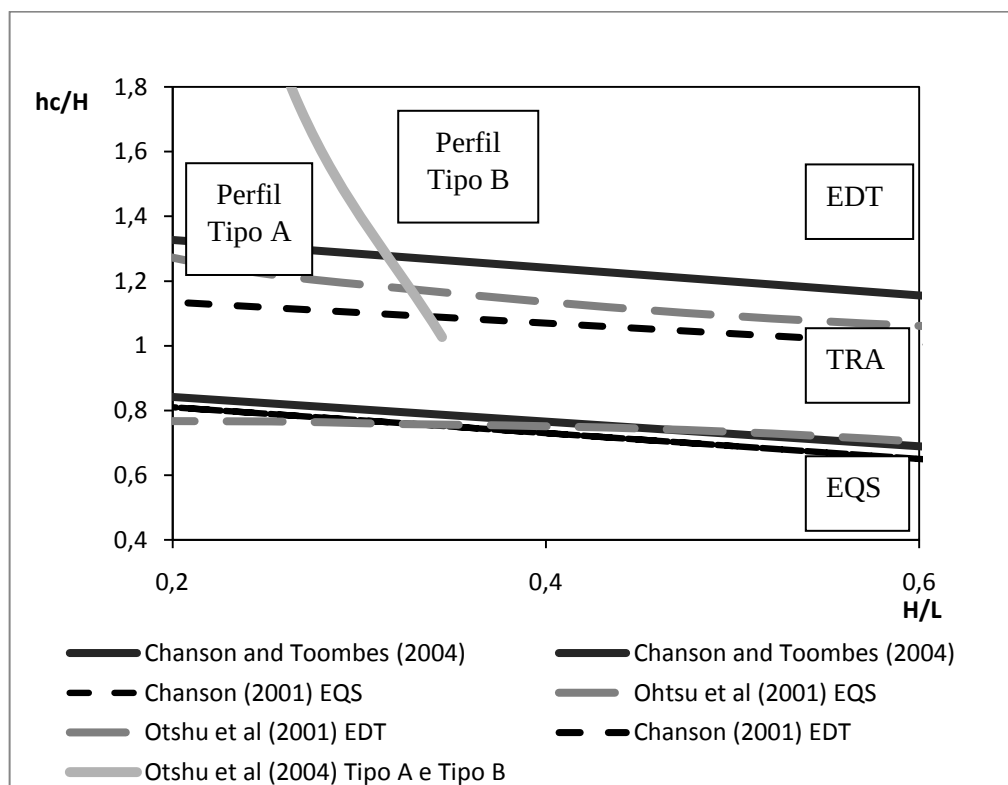


Figura 2.15. Representação dos limites de escoamento apresentados por Chanson (2001), Ohtsu et al (2001), Ohtsu (2004) e Chanson and Toombes (2004).

Pode-se ainda constatar que os vários autores são bastante coerentes nas propostas que apresentam para os regimes de escoamento, à excepção de Fael (2000) que apresenta um grande desfazamento no que conta ao limite do escoamento em quedas sucessivas, isto porque o autor, como já apresentado no ponto 2.3.1, adopta como limite para este tipo de escoamento o proposto por Chanson (1994) o qual não considerava a existencia de um regime de transição. Verifica-se uma diferença entre a proposta de Fael e Pinheiro(2006) relativamente à apresentada pelos restantes autores.

Um estudo comparativo entre descarregadores em degraus convergentes e não convergentes foi apresentado por André e Ramos (2004). Estes definiram limites de ocorrência para os regimes de escoamento que, quando comparados com as outras teorias apresentadas, apresentavam mudanças entre regimes para caudais mais baixos.

2.4 AREJAMENTO DO ESCOAMENTO EM DESCARREGADORES DE CHEIA EM DEGRAUS

O emulsionamento de ar ou arejamento do escoamento num canal descarregador em degraus é um factor muito importante tanto no dimensionamento como na caracterização do escoamento.

Estudos em modelo reduzido têm sido desenvolvidos nesta temática e permitiram encontrar equações capazes de caracterizar algumas das características do escoamento como a altura de água da camada limite, a posição de início de arejamento, a concentração média de ar no escoamento e os perfis de concentração de ar (Chanson (1995), Chanson and Toombes (2002), Frizzel (2006)).

O conhecimento da posição do ponto início de arejamento e da concentração de ar no escoamento são as características mais importantes para a definição da altura das paredes laterais do descarregador, pois o dimensionamento destas, dependente da altura de água que o escoamento apresenta ao longo do descarregador.

Meireles (2005) divide o escoamento ao longo do descarregador em 4 troços distintos, sendo que ocorrem de montante para jusante ao longo do descarregador, dependentes do caudal escoado, nas Figura 2.16 é possível visualizar o perfil longitudinal característico deste tipo de escoamento.

- Escoamento sem emulsionamento de ar – a superfície livre apresenta-se lisa e sem perturbações. À medida que o escoamento se processa de montante para jusante, a camada limite da superfície livre ganha ondulação até a secção de entrada de ar, a chamada secção de afloramento da camada limite;
- Escoamento com emulsionamento de ar parcialmente desenvolvido – após ser atingida a secção de afloramento da camada limite o ar começa a misturar-se com o escoamento dando origem a uma maior intensificação das bolhas de ar nas cavidades dos degraus que por sua vez leva a uma maior nitidez dos vórtices formados naquelas zonas;
- Escoamento com emulsionamento de ar completamente desenvolvido - a profundidade média de penetração das bolhas de ar aumenta rapidamente até atingir a soleira do degrau;
- Escoamento uniforme - atingindo quando se encontra o ponto de equilíbrio entre efeitos gravíticos e as forças resistentes originadas pelo atrito da soleira dos degraus. Ponto no qual as grandezas características do escoamento, como altura equivalente de água, concentração média de ar, distribuições da velocidade e da concentração de ar, se tornam constantes ao longo do percurso. A partir desse momento e ate ao fim do canal, se este não sofrer alterações, o escoamento dá-se sempre da mesma forma.

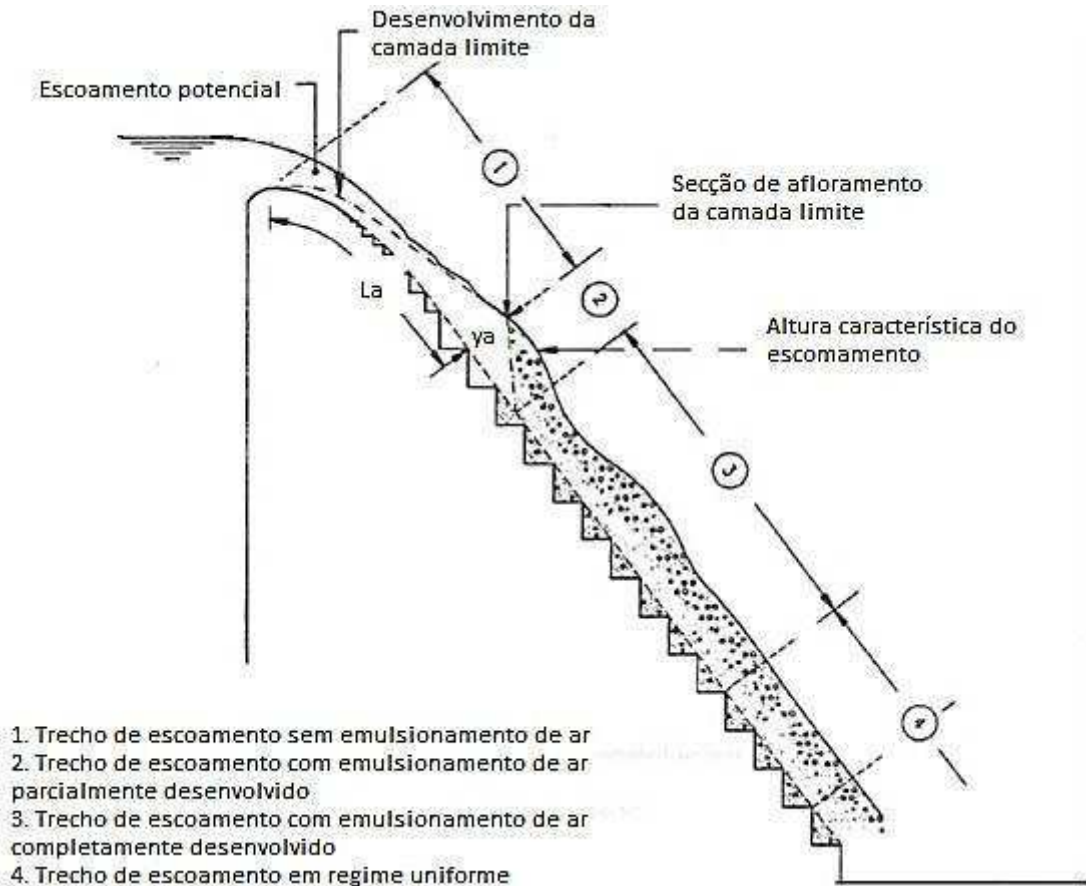


Figura 2.16. Escoamento deslizante sobre turbilhões em descarregadores de cheias em degraus, representação esquemática do perfil longitudinal. Fonte: Meireles (2005) (adaptado).

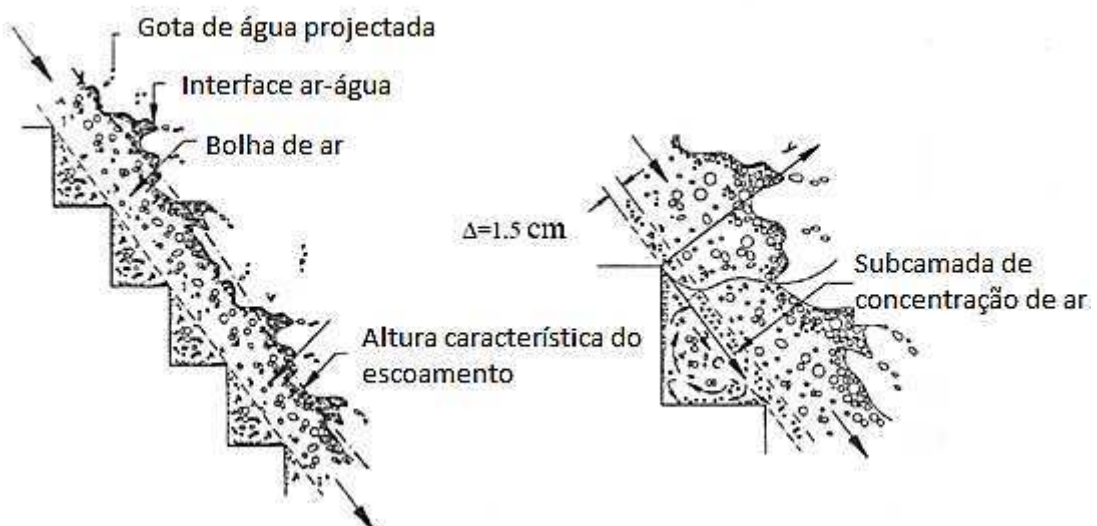


Figura 2.17. Escoamento deslizante sobre turbilhões, representação do pormenor do perfil longitudinal e padrão de escoamento secundário na zona turbilhonar. Fonte: Meireles (2005) (adaptado).

2.4.1 PONTO DE INÍCIO DE AREJAMENTO

Para compreender algumas das expressões que serão apresentadas neste ponto é necessário conhecer algumas das variáveis que definem o ponto de início de arejamento. A Figura 2.18 representa esquematicamente essas variáveis. “ L_a ” representa a distância entre a zona de formação da camada limite e a secção de início de arejamento, “ y_a ” representa a profundidade do escoamento no ponto de início de arejamento e “ k ” a altura da rugosidade criada pelo degrau dada por $k=H*\cos(\alpha)$ com H igual a altura do degrau.

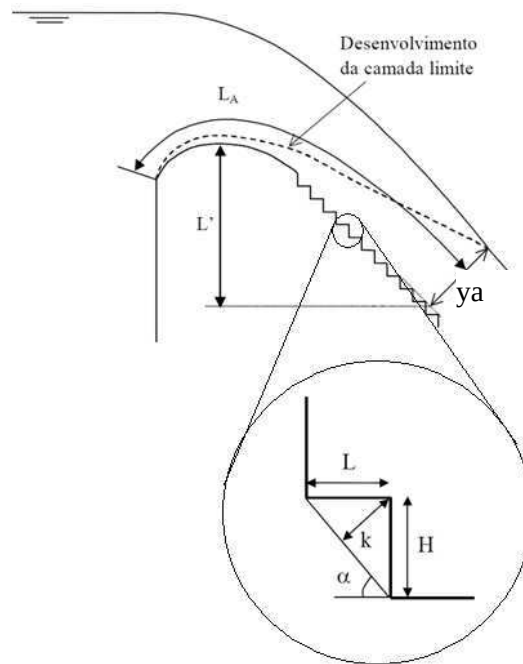


Figura 2.18. Esquema simplificado de alguns parâmetros que serão abordados neste tópico.

Quando se analisa um descarregador com calha lisa, o ponto crítico de arejamento é o ponto em que a espessura da camada limite coincide com a altura do escoamento. O escoamento a partir desse ponto apresenta uma superfície bastante irregular, resultante da entrada de ar. No caso do descarregador em degraus, o princípio de formação do ponto crítico é o mesmo, contudo o ponto de início de arejamento aparece mais a montante neste tipo de descarregador. Este facto está intimamente ligado com a turbulência originada pela macrorugosidade dos degraus (k) provocando alturas de água superiores, fazendo com que a intersecção entre as duas superfícies se posicione mais a montante.

A posição do início do arejamento foi apresentada por Gonzales and Chanson (2005), com base em estudos apresentados por Chanson (1995), Chanson and Toombes (2002b) e Gonzales and Chanson (2004), como se indica na expressão (2.13):

$$\frac{L_a}{h \cos(a)} = 9.72 * \sin(a)^{0.080} * F_*^{0.71} \quad (2.13)$$

Na expressão (2.13), q_w corresponde ao caudal unitário ao longo do descarregador e α , como se pode ver na Figura 2.18, é o ângulo formado pela soleira do degrau até à aresta do degrau anterior. F_* é dado pela expressão (2.14):

$$F_* = \frac{q_w}{\sqrt{g \sin(a) (h \cos(a))^3}} \quad (2.14)$$

Frizell (2006) faz referência a conclusões tiradas da comparação entre descarregadores de degraus com e sem rugosidade, no que respeita a posição de início de arejamento. A comparação foi efectuada para um descarregador com $\alpha = 22^\circ$ com o qual encontrou um valor de L_a para descarregadores em degraus com rugosidade cerca de 35% superior aos verificados para o descarregador sem rugosidade. O resultado sugere um crescimento mais lento da fronteira do escoamento turbulento nos descarregadores em degraus com rugosidade e consequentemente menos energia dissipada na região sem arejamento. A profundidade de escoamento, y_a , segundo Chanson (2002) poderá ser obtida através da relação y_a/k , pela expressão (2.15):

$$\frac{y_a}{k} = \frac{0.4034}{\sin(\alpha)^{0.04}} F_*^{0.592} \quad (2.15)$$

Boes e Hanger (2003b) sugerem para o cálculo de L_a e y_a respectivamente as expressões (2.16) e (2.17), sendo que à semelhança de Chanson (2002) os autores encontram y_a através da relação com a rugosidade, k , desde que $F_* < 45$ e $26^\circ < \alpha < 55^\circ$.

$$L_a = \frac{5.9 * h c^{6/5}}{H^{1/5} * \sin(\alpha)^{7/5}} \quad (2.16)$$

$$\frac{y_a}{k} = 0.4 * F_*^{0.6} \quad (2.17)$$

Matos (1999) sugere para o cálculo da posição de início de arejamento e correspondente profundidade de escoamento, formulações partindo do pressuposto de que os parâmetros estão dependentes de F_* . Simões (2008) verificou que tal consideração conduz a diferenças inferiores em cerca de 70.11% face às propostas de Chanson (2002). Contudo a relação y_a/k aproxima-se dos valores encontrados pelas restantes referências mencionadas. As expressões (2.18) e (2.19) traduzem as propostas de Matos (1999).

$$\frac{L_a}{k} = 6.289 * F_*^{0.734} \quad (2.18)$$

$$\frac{y_a}{k} = 0.361 * F_*^{0.606} \quad (2.19)$$

André e Ramos (2004) caracterizaram a secção de início de arejamento em descarregadores de degraus com largura variável pelas expressões (2.20) e (2.21).

$$\frac{L_a}{k} = 5.869 * F_*^{0.858} \quad (2.20)$$

$$\frac{y_a}{k} = 0.283 * F_*^{0.684} \quad (2.21)$$

2.4.2 CONCENTRAÇÃO DE AR NO ESCOAMENTO

A concentração média de ar no escoamento é uma característica de máxima importância pois está associada à altura de água que, como já foi referido, é factor determinante de dimensionamento de descarregadores quer sejam de paramento liso quer sejam em degraus. Para além das alturas de água, existindo concentrações de ar mínimas, é prevenida a ocorrência de cavitação, isto porque a emulsão (ar + água) é capaz de absorver o impacto das bolhas que por sua vez provocam o fenómeno em causa.

A concentração de ar (C)² é definida como a razão entre o volume de ar e o volume da emulsão (expressão (2.22)).

$$C = \frac{Var}{Var+V_{\text{água}}} \quad (2.22)$$

Outra definição importante é a chamada profundidade equivalente “d”, que corresponde a uma profundidade fictícia de água e que segundo Dai Prá (2004), foi definida por Chanson (1989) em função da concentração média de ar do escoamento e que pode ser obtida pela expressão (2.23). Onde d_{90} corresponde a profundidade do escoamento arejado correspondente a uma concentração de ar de 90% e $\bar{C}$ representa a concentração média de ar ao longo da profundidade independente da distância ao pseudo-fundo e variável ao longo do canal até ser atingido o escoamento uniforme.

$$d = (1 - \bar{C}) * d_{90} \quad (2.23)$$

Diez-Cascon et al (1991), Chamani e Rajaratnam (1999), Matos e Quintela (1995), Povh (2000) Povh and Tozzi (2001), Ohstu, Yasuda e Takahashi (2004), publicaram nos seus trabalhos várias expressões que permitem calcular as concentrações de ar em profundidade com base na posição ao longo do descarregador.

Diez-Cascon et al (1991) consideram que o que acontece no descarregador em calha lisa pode também ser aplicado a descarregadores em degraus, como tal adoptam a proposta de cálculo da concentração média de ar do Comité Científico da American Society of Civil Engineers (1961) (expressão (2.24)).

$$\bar{C} = 0.743 * \log\left(\frac{\sin(\alpha)}{q_w^{0.5}}\right) + 0.723 \quad (2.24)$$

Em que q_w representa o caudal específico do escoamento.

Chamani and Rajaratnam (1999) efectuaram o estudo para descarregadores com α entre 59° e 31.34° e concluíram que a expressão utilizada até então pelo comité não satisfazia os resultados encontrados, como tal propuseram uma a expressão (2.25) aplicável a $0.2 < q_w < 0.27$ [l/s/m]

$$\bar{C} = 0.93 * \log\left(\frac{\sin(\alpha)^{0.1}}{q_w^{0.3}}\right) + 1.05 \quad (2.25)$$

Matos e Quintela (1995) determinam que a concentração média de ar no escoamento pode ser descrita em função da Hv/hc , sendo Hv altura total do descarregador e hc a altura crítica do escoamento. Posteriormente Matos (2000) sugeriu um a expressão (2.26) para determinação da concentração média de ar no escoamento, válida para $10 < \frac{Hv}{hc} < 100$

$$\bar{C} = 0.62 - \frac{55.6}{\left(\frac{Hv}{hc}\right)^2} \quad (2.26)$$

Povh and Tozzi (2001) após avaliação dos dados já existentes, e pela incerteza existente pela dispersão de valores, propuseram uma variante de cálculo com base nos valores analisados (expressão (2.27)).

$$\bar{C} = 0.62 - \frac{11}{\left(\frac{Hv}{hc}\right)^2} \quad (2.27)$$

² Em alguns artigos a concentração média de ar aparece como sendo “void fraction”.

Por fim, Ohstu, et al (2004) estudaram a concentração de ar no escoamento quase-uniforme. Estes autores chegaram à conclusão que em canais descarregadores em degraus a concentração média de ar no escoamento é função da altura de escoamento verificada (h/h_c):

$$\bar{C} = D - 0.30 * e^{(-5 * (\frac{h}{h_c})^2 - 4 * \frac{h}{h_c})} \quad (2.28)$$

Onde D é um parâmetro adimensional que toma valores consoante o ângulo do descarregador.

$$D=0.30 \quad 5.7^\circ < \alpha < 19^\circ \text{ e } 0.1 < \frac{h}{h_c} < (\frac{h}{h_c})_{onset} ,$$

$$D = -2 * 10^{-4} * \alpha^2 + 2.14 * 10^{-2} * \alpha - 3.57 * 10^{-2} \quad 19^\circ < \alpha < 55^\circ \text{ e } 0.1 < \frac{h}{h_c} < (\frac{h}{h_c})_{onset}$$

Sendo que $(\frac{h}{h_c})_{onset}$ corresponde ao limite de ocorrência do regime deslizante sobre turbilhões.

O estudo do emulsionamento e concentrações de ar não foi explorado no presente estudo, pois embora se compreenda a importância do mesmo, não existiram condições técnicas nem tempo disponível para desenvolver o tema.

2.5 FACTORES DE RESISTÊNCIA E DE DISSIPAÇÃO DE ENERGIA

Os descarregadores de cheia em degraus têm como principal objectivo dissipar energia ao longo do canal descarregador, conseguindo assim minimizar os custos associados à construção de dispositivos de dissipação a jusante do descarregador.

A dissipação de energia, principalmente cinética, é possível através de 3 formas:

- Atrito do escoamento com as fronteiras sólidas;
- Turbulência do escoamento;
- Atrito e emulsionamento com o ar;

Com base nisto e nos pontos abordados anteriormente, verifica-se que os descarregadores em degraus desempenham a função de dissipar energia de uma forma mais eficiente face às soluções tradicionais.

Simões (2008) faz referência às metodologias utilizadas ao longo dos últimos anos dentro deste tema, para avaliação da energia na secção de jusante do descarregador (energia residual) nomeadamente:

- Pela formação de ressalto hidráulico a jusante do canal, medindo uma das alturas conjugadas e posteriormente calcular a energia residual,
- Através da determinação do perfil da lâmina líquida ao longo do canal para posterior cálculo da energia residual no pé do descarregador.

O uso destas metodologias depende do conhecimento da perda de carga ao longo do escoamento no canal. Como tal, vários autores como Christodoulou (1993), Diez- Cascon et al (1991), Friizell (1992) e Chanson and Toombes (2000) tentaram ajustar o uso de equações de resistência como a de Darcy-Weisbach ao escoamento em canal em degraus. Os estudos centraram-se na busca de expressões que permitissem caracterizar o factor de resistência de Darcy-Weisbach (f) com o qual é possível conhecer a dissipação de energia ao longo do canal descarregador.

Nos Subcapítulos seguintes são apresentados alguns dos estudos dentro desta temática.

2.5.1 FACTORES DE RESISTÊNCIA

O factor de resistência de Darcy-Weisbach tem sido alvo de estudo por vários autores, partindo do princípio que o escoamento atinge uma zona de regime uniforme. Para escoamento em quedas sucessivas este princípio é facilmente verificado, contudo para escoamento deslizante sobre turbilhões nem sempre o comprimento do canal descarregador permite que o escoamento uniforme seja atingido.

Rajaratnam (1990) para definir o factor de resistência de Darcy-weisbach (f) relacionou-o com o coeficiente de atrito (c_f), sendo que este representa $\frac{1}{4}$ de f . O autor definiu o coeficiente de atrito (c_f) a partir do teorema da quantidade de movimento partindo do pressuposto que o escoamento estaria totalmente desenvolvido após os primeiros degraus (expressão (2.29)).

$$c_f = \frac{2 \cdot h_n^3 \cdot g \cdot \sin(\alpha)}{Q^2} \quad (2.29)$$

h_n corresponde à profundidade uniforme de escoamento, isto é, à altura de água considerando que o escoamento é uniforme.

Stephenson (1991) apresenta a expressão (2.30) para estimar o factor de resistência (f) para escoamentos turbulentos rugosos, desde que este tenha atingido a zona de arejamento uniforme.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 1.14 \cdot 2 \cdot \log\left(\frac{4h_n}{k}\right) \quad (2.30)$$

Chanson (1994^a) concluiu, após diversas observações, que o factor de resistência era independente do número de Reynolds. Verificou que para estruturas com declives compreendidos entre 50° e 55° o factor de resistência encontrava-se entre 0.17 e 5.0, enquanto que para pequenas inclinações, menores que 12° , desprezando os efeitos de arejamento do escoamento, o factor de resistência seria função do raio hidráulico do canal (D_H), dado pela expressão (2.31).

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 1.42 \cdot \ln\left(\frac{D_H}{k}\right) - 1.25 \quad (2.31)$$

Chanson (2002) apresenta na Figura 2.19 os estudos efectuados até à época dos factores de resistência de Darcy-Weisbach. É possível verificar a dispersão que existe nos valores adoptados. O autor constatou que existia uma certa concordância com os valores 0.105, 0.17 e 0.30 por parte dos diversos autores e resultados alvo de análise.

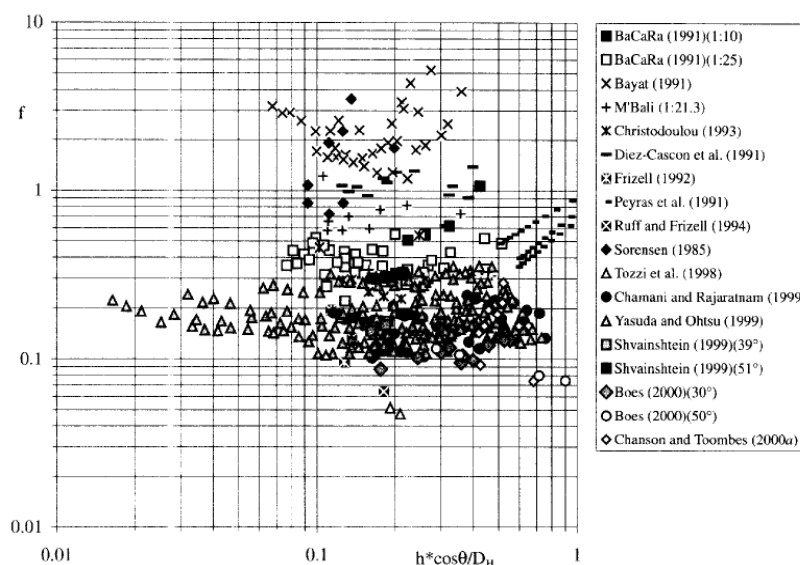


Figura 2.19. Factores de resistência de Darcy-Weisbach, segundo diversos autores de acordo com Chanson et al (2002). Fonte: Chanson et al (2002).

Na mesma publicação o autor afirma que a rugosidade proporcionada pelos degraus apresenta uma contribuição muito significativa na resistência do escoamento devido à formação de vórtices entre o escoamento principal e o pseudo-fundo.

Chanson and Toombes (2004) avaliaram o factor de resistência na zona de escoamento arejado e comentaram que o escoamento de transição, em termos de factores de resistência, seria comparável ao escoamento deslizante sobre turbilhões, concluindo que para maximizar a transferência de gases o escoamento mais apropriado seria o escoamento de transição.

Chanson (2005), com base nos dados apresentados por vários autores para valores de α compreendidos entre 3.5 e 63.4, verificou que os valores dominantes para o factor de resistência, f , seriam 0.10, 0.16 e 0.28.

Simões (2008) faz referência ao factor de resistência proposto por Chanson ao entrar em consideração com a concentração média de ar no escoamento e apresenta para o mesmo um valor de 0.20.

No Quadro 2.2 é feita uma síntese dos valores alvo de comparação pelas diferentes referências bibliográficas para os valores de f . De notar que os valores estão dependentes do tipo de ensaio em que os autores se basearam, não existindo contudo um conhecimento relativo aos mesmo.

Quadro 2.2. Síntese dos valores apresentados para f pelas diversas referências bibliográficas apresentadas.

Referência bibliográfica	f
André e Ramos (2004)	1.0
	0.05
	0.15
Chanson (2002)	0.105
	0.17
	0.20
	0.30
Chanson (2005)	0.16
	0.28
	0.10
Simões (2008)	0.20

2.6 DISSIPACÃO DE ENERGIA

O cálculo da energia no pé do descarregador foi avaliado em vários estudos alguns dos quais serão apresentados no presente subcapítulo, nomeadamente métodos de cálculo de energia empíricos ou com base em princípios fundamentais de hidráulica.

Stephenson (1991) afirma que a dissipação de energia torna-se mais eficaz quanto maior for o comprimento longitudinal do degrau desde que o regime de escoamento seja deslizante sobre

turbilhões. Assim o autor aconselha que o descarregador seja dimensionado para que, ao longo do canal, o escoamento possa atingir o regime uniforme. A expressão (2.32), segundo o autor, permite a avaliação da dissipação de energia considerando as condições anteriormente definidas.

$$\frac{\Delta E}{E_m} = 1 - \left[\left(\frac{f}{8 \cdot \sin \alpha} \right)^{\frac{1}{3}} * \cos \alpha + \frac{1}{2} * \left(\frac{f}{8 \cdot \sin \alpha} \right)^{-\frac{2}{3}} \right] * \frac{hc}{Hv} \quad (2.32)$$

O factor de resistência f a adoptar é o indicado na expressão (2.30), ΔE representa a diferença entre energia específica a montante e energia residual num ponto a considerar, E_m a energia a montante, hc corresponde a altura crítica do escoamento e Hv a altura total do descarregador, desde a crista até à cota da bacia de dissipação.

Chanson (1994) apresenta duas formas de quantificação da variação de energia consoante o regime de escoamento no descarregador, com base na relação $\Delta E/E_m$ sendo E_m a energia máxima disponível a montante. Para o escoamento em quedas sucessivas e escoamento deslizante sobre turbilhões o autor sugere, respectivamente, as expressões (2.33) e (2.34).

$$\frac{\Delta E}{E_m} = 1 - \left[\frac{0.54 * \left(\frac{hc}{H} \right)^{0.275} + \frac{3.43}{2} * \left(\frac{hc}{H} \right)^{-0.55}}{\frac{3}{2} + \left(\frac{Hv}{hc} \right)} \right] \quad (2.33)$$

$$\frac{\Delta E}{E_m} = 1 - \left[\frac{\left(\frac{f}{8 \cdot \sin \alpha} \right)^{\frac{1}{3}} * \cos \alpha + \frac{1}{2} * \left(\frac{f}{8 \cdot \sin \alpha} \right)^{-\frac{2}{3}}}{\frac{3}{2} + \frac{Hv}{hc}} \right] \quad (2.34)$$

Rice e Kadavy (1996) estudaram a dissipação de energia num modelo construído à escala 1/20 com uma inclinação de 21.8° e concluíram que a dissipação de energia em descarregadores em degraus é cerca de 2.4 a 2.9 vezes superior à dissipada num descarregador de calha lisa.

André e Ramos (2004) quantificam a dissipação de energia pela razão entre a energia residual e energia máxima no pé do descarregador ($Hr/H_{m\acute{a}x}$).

$$\frac{Hr}{H_{m\acute{a}x}} = \left[\frac{\left(\frac{f}{8 \cdot \sin \alpha} \right)^{\frac{1}{3}} * \cos \alpha + \frac{1}{2} * \left(\frac{f}{8 \cdot \sin \alpha} \right)^{-\frac{2}{3}}}{\frac{3}{2} + \frac{Hv}{hc}} \right] \quad (2.35)$$

Sendo que $H_{m\acute{a}x}$ pode ser calculado pela relação $H_{m\acute{a}x} = Hv + 1.5 * hc$, em que Hv corresponde à altura medida entre a crista e a soleira da secção de jusante do descarregador e Hr corresponde à energia específica residual do escoamento na secção em análise.

No mesmo estudo, apresentam algumas conclusões comparativas entre descarregadores de cheia em canal, nomeadamente entre calha lisa e em degraus com ou sem convergência das paredes laterais:

- A perda de carga em descarregadores em degraus está entre 2 a 5 vezes acima da perda de carga em descarregadores de canal liso,
- A dissipação de energia pouco depende da altura dos degraus, contudo degraus com alturas superiores apresentam valores relativamente mais elevados de dissipação de energia;
- Para caudais mais elevados, menor será a eficácia da dissipação de energia;
- Descarregadores em degraus convergentes apresentam um comportamento muito idêntico aos de largura constante, notando-se que os últimos dissipam mais 11% do que os primeiros.

Ferreira (2009) no estudo efectuado para um descarregador em degraus com rugosidade aparente das paredes elevada, encontrou valores para a dissipação de energia, expressa pela relação $\Delta E/E_m$, da

ordem dos 90%, sendo este valor o referente ao caudal máximo ensaiado pelo autor. Na Figura 2.20 é possível visualizar os valores obtidos pelo referido autor para a gama de caudais ensaiada.

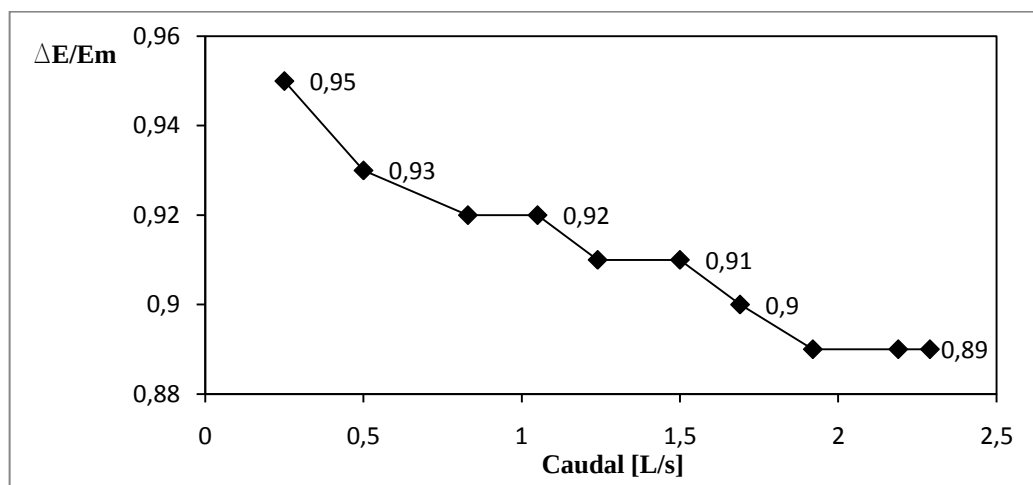


Figura 2.20. Valores máximos, para cada caudal ensaiado, da dissipação de energia obtidos por Ferreira (2009) para um descarregador de cheias em canal em degraus com elevada rugosidade aparente das paredes.

2.7 EFEITOS DE ESCALA

A construção de modelos físicos é imperativa quando se pretende efectuar o projecto de uma obra hidráulica com a grande importância como é o caso do projecto de uma barragem. No seguimento desta necessidade surgem os efeitos de escala, consequência da incorrecta simulação dos fenómenos físicos de interacção com a estrutura e da impossibilidade de simultaneamente obter todos os parâmetros adimensionais iguais em modelo e protótipo.

A gravidade e a pressão são forças importantes para os modelos de simulação em causa levando a que o modelo mais utilizado seja o de Froude (Subcapítulo 3.2). Os efeitos de escala são consequência de, em detrimento das forças enunciadas anteriormente, não se considerarem outras forças intervenientes como a viscosidade, a elasticidade e a tensão superficial.

Nas análises dos modelos hidráulicos de descarregadores, o estudo dos efeitos de escala foi abordado por diversos autores, nomeadamente no que diz respeito ao arejamento do escoamento e campo de pressões variáveis, factores de grande importância na passagem modelo protótipo.

No que diz respeito a escoamentos com emulsão de ar, a impossibilidade de compatibilização dos modelos de semelhança de Froude (forças de inércia/forças gravíticas), Weber (forças de inércia/forças de tensão superficial) e Reynolds (forças de inércia/forças viscosas) faz com que as bolhas de ar criadas no protótipo não sejam correctamente reproduzidas no modelo. No entanto, tal facto encontra-se salvaguardado por diversos estudos publicados ao longo dos anos que defendem que estes efeitos são minorados desde que a escala geométrica e certas relações entre modelo e protótipo sejam cumpridas, isto é, adoptando uma escala correcta a concentração média de ar e a distribuição adimensional da concentração de ar no protótipo e no modelo são aproximadamente iguais.

Num estudo recente de Frizzel (2006) o autor faz referência a esta problemática, através de uma reflexão sobre as conclusões das investigações feitas por parte de diversos autores Takahashi, et al (2005), Gonzales and Chanson (2004) e Boes and Hager (2003) defendem que a semelhança de Froude é adequada para retratar o arejamento do escoamento assim como a dissipação de energia desde que os limites impostos para os números de Reynolds e Weber sejam respeitados.

O autor propõe, com base em estudos de Takahashi, et al (2005), que o número de Reynolds (Re), para que os efeitos de escala não sejam considerados, seja superior a (4×10^4). Quanto ao número de Weber o autor faz referência a estudos efectuados por Gonzales and Chanson (2004), Boes and Hager (2003) que defendem que o valor a apresentar pelo número deve ser no mínimo 100.

Nesta temática é necessário ter a consciência de que os efeitos de escala são mais notórios em descarregadores de cheia em degraus do que em calha lisa, uma vez que os efeitos de dissipação de energia e emulsão de ar se encontram mais vinculados.

3

INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL E EQUIPAMENTO DE MEDIÇÃO

3.1 DESCRIÇÃO DA INSTALAÇÃO

A instalação utilizada para realização do trabalho experimental desenvolvido no âmbito desta dissertação, encontra-se no Laboratório de Hidráulica e Recursos Hídricos e Ambiente da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. O canal em análise é o modelo de um descarregador de cheias em degraus, com parte do seu desenvolvimento convergente.

O funcionamento da instalação processa-se em circuito fechado que, como se pode ver na figura 3.1, é constituído por um sistema de reservatórios e tubagens na qual se integra a secção de estudo. A água retida no reservatório de alimentação é conduzida por uma tubagem ao reservatório de tranquilização, situado a montante do descarregador, sendo por este conduzida ao canal de restituição que a descarrega num reservatório de bombagem, donde é bombeada através de uma bomba submersível para o reservatório de alimentação anteriormente referido.

Na Figura 3.1 é possível visualizar um esquema da instalação que foi utilizada no trabalho experimental. Nas Figura 3.2, Figura 3.3 e Figura 3.4 encontram-se imagens das diversas componentes do sistema.

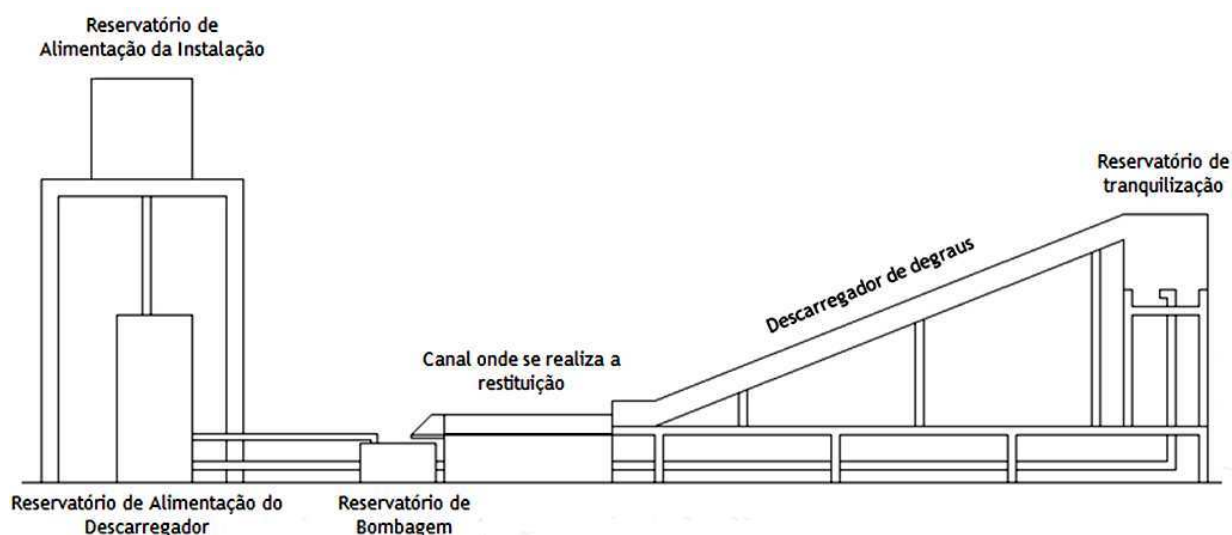


Figura 3.1. Representação da instalação experimental utilizada. Fonte: Figueiredo (2010)



Figura 3.2. Reservatório de alimentação da instalação.



Figura 3.3. Reservatório de tranquilização e canal descarregador de cheias em degraus.



Figura 3.4. Canal de restituição e reservatório de bombagem.

O descarregador em estudo foi realizado em betão com pequenas porções das suas paredes laterais em perspex, para permitir o acesso visual do escoamento. Tem um comprimento total de 2,6 m e uma altura de 1,0 m, que origina uma inclinação de aproximadamente $21,04^\circ$. É um descarregador com troço convergente que possui 26 degraus com aproximadamente 3.75 cm de altura (H) e com uma largura de degrau (B) que varia entre 15 e 5 cm. A largura do degrau é decresce de montante para jusante entre os degraus 1 e 13 sendo que nos restantes degraus apresentam secção constante.

Na Figura 3.5 a), b), c) é possível visualizar alguns pormenores relativos ao modelo do canal descarregador em degraus, respectivamente, a sua vista frontal, a zona de convergência e vista lateral.

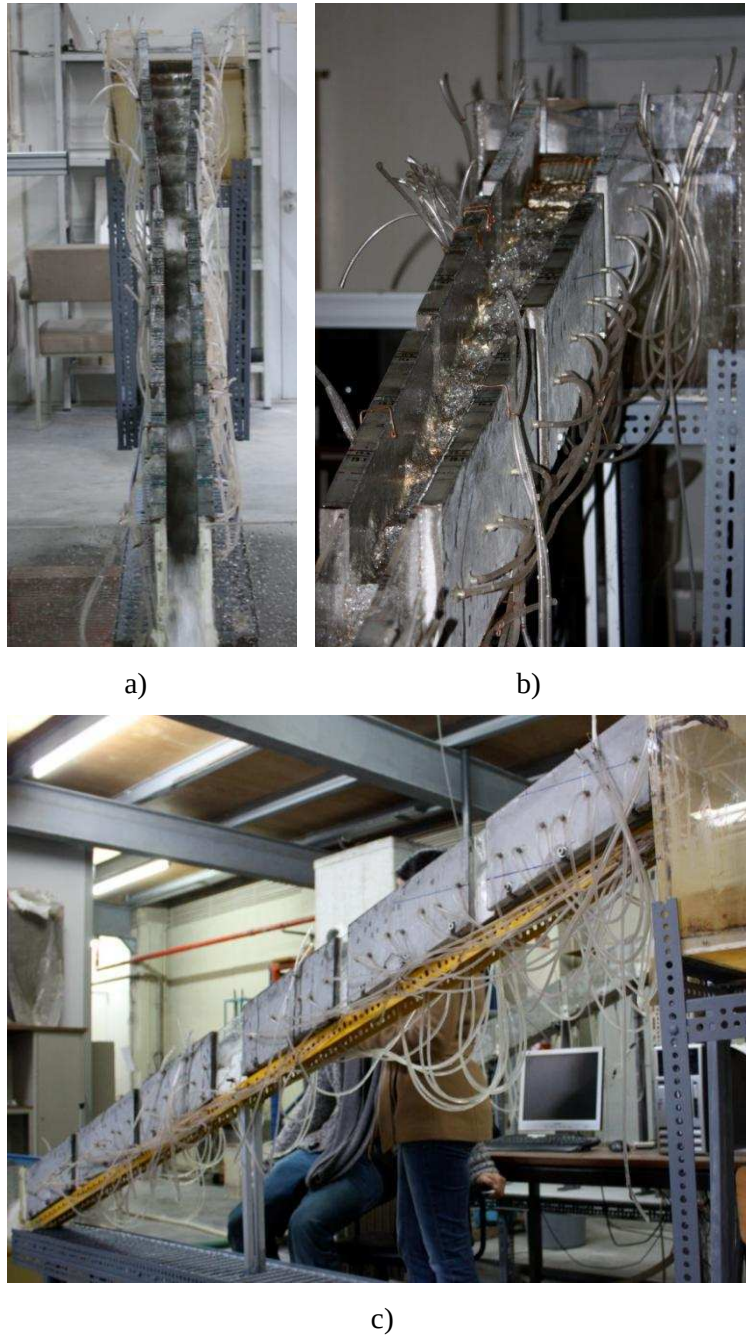


Figura 3.5. Pormenor do descarregador de cheias em canal, em degraus. a) Vista frontal; b) zona de convergência; c) Vista lateral.

3.2 MODELO DE SEMELHANÇA UTILIZADO

O modelo físico do descarregador de cheias em canal em degraus encontra-se construído à escala geométrica de 1/40.

Como referido no capítulo 2, durante o fenómeno de escoamento actuam 6 forças fundamentais, forças de inércia, de viscosidade, de gravidade, de pressão, de tensão superficial e de compressão elástica, contudo podem ser desprezadas as contribuições de forças cuja ordem de grandeza não é tão significativa. Optou-se por um modelo que segue a semelhança de Froude, a qual é traduzida pela igualdade dos números de Froude no modelo e no protótipo.

$$\lambda = \frac{Fr_{Modelo}}{Fr_{Protótipo}} \quad (3.1)$$

O número de Froude (Fr) é dado pela razão entre as forças de inércia e as forças de gravidade, em escoamentos em canal com superfície livre (expressão (3.2)).

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{g \cdot h_0}} \quad (3.2)$$

Sendo utilizado o mesmo fluido no modelo e no protótipo, sujeito por sua vez ao mesmo campo gravitacional de forças, as grandezas de escala para as outras forças intervenientes são obtidas igualando o número de Froude no modelo ao protótipo. O Quadro.3.2 apresenta as razões encontradas para a semelhança de Froude.

Quadro 3.1. Razões de escala (λ) segundo a semelhança de Froude

Razões de escala segundo a lei de Froude					
Semelhança geométrica		Semelhança cinemática		Semelhança dinâmica	
Comprimento	λ_L	Tempo	$\lambda_L^{1/2}$	Força	λ_L^3
Área	$\lambda_L^{1/2}$	Velocidade	$\lambda_L^{1/2}$	Massa	λ_L^3
Volume	λ_L^3	Aceleração	λ_L	Pressão	λ_L
		Caudal	$\lambda_L^{5/2}$	Trabalho	λ_L^4
		Caudal unitário por largura	$\lambda_L^{3/2}$	Potência	$\lambda_L^{7/2}$

3.3 EQUIPAMENTO DE MEDIÇÃO

Sendo o objectivo do trabalho a caracterização dos escoamentos no descarregador, foi necessária utilização de equipamentos que permitissem avaliar valores de caudais escoados e valores de alturas de água nas diferentes secções do escoamento. Apresentam-se nos pontos seguintes os principais equipamentos utilizados.

3.3.1 MEDIÇÃO DE CAUDAIS

A medição de caudais foi efectuada com recurso a um medidor de caudais electromagnético (Figura 3.6), instalado na tubagem entre o reservatório de abastecimento ao descarregador e o reservatório de tranquilização. O equipamento utilizado é da marca Fisher&Porter, modelo MAG-XE, e permite a leitura directa dos caudais no seu mostrador.



Figura 3.6. Medidor de caudais electromagnético utilizado.

3.3.2 ALTURAS DE ÁGUA

Como referido anteriormente, é parte fundamental do estudo avaliar as alturas de água nas várias secções de escoamento, tendo sido, para tal, consideradas duas hipóteses de medição distintas. Uma utilizando tubos piezométricos colocados em tomadas de pressão situadas nos patamares dos degraus e nas paredes do descarregador, representado na Figura 3.7 e outra através da utilização e um sistema de flutuador ligado a um potenciómetro e ilustrado na Figura 3.8.

Pelo primeiro processo, as alturas de água podem ser obtidas de forma directa, isto é, por medição da altura de água nos piezómetros, ou através do registo efectuado por um transdutor de pressão a eles ligado. O estudo através deste método só foi efectuado para o primeiro degrau, dado que para os restantes degraus as características do escoamento e o elevado emulsionamento com ar originavam valores de alturas de água não correctos, impossibilitando a sua utilização.



Figura 3.7. Tubos piezométricos e tomadas de pressão instalados no descarregador em análise.

O segundo método consiste em medir as alturas de água através do uso de um sistema de flutuador/potenciómetro. Este sistema é constituído por um corpo flutuador em poliestireno ligado a um potenciómetro. O potenciómetro possui um cursor cuja posição está dependente da altura de água. Quando ligado a um circuito eléctrico e com a mudança da a posição do cursor a diferença de potencial nos seus terminais sofre uma variação através da qual é possível obter uma relação $V=f(h)$ onde V é a tensão eléctrica nos terminais do potenciómetro e h a altura de água no escoamento. A tensão é lida por uma placa de aquisição de dados da National Instruments, a qual converte um sinal analógico num sinal digital para posterior análise e tratamento (subcapítulo 3.4).

O corpo flutuador, com um diâmetro de 2 cm, foi colocado na extremidade de uma vareta de aço que passa pelo seu centro de gravidade e que liga o corpo ao referido potenciómetro.



Figura 3.8. Sistema flutuador/potenciómetro.

As posições do flutuador correspondem a distintas posições angulares da vareta, pelo que é possível através de relações matemáticas básicas encontrar uma relação entre o sinal emitido e a referida posição do flutuador. Sendo que como referido anteriormente a relação entre a posição do flutuador e o respectivo sinal adquirido deverá ser linear.

Na Figura 3.9 é feita uma representação esquemática das variáveis intervenientes no processo de calibração do corpo flutuador, dispositivo potenciômetro.

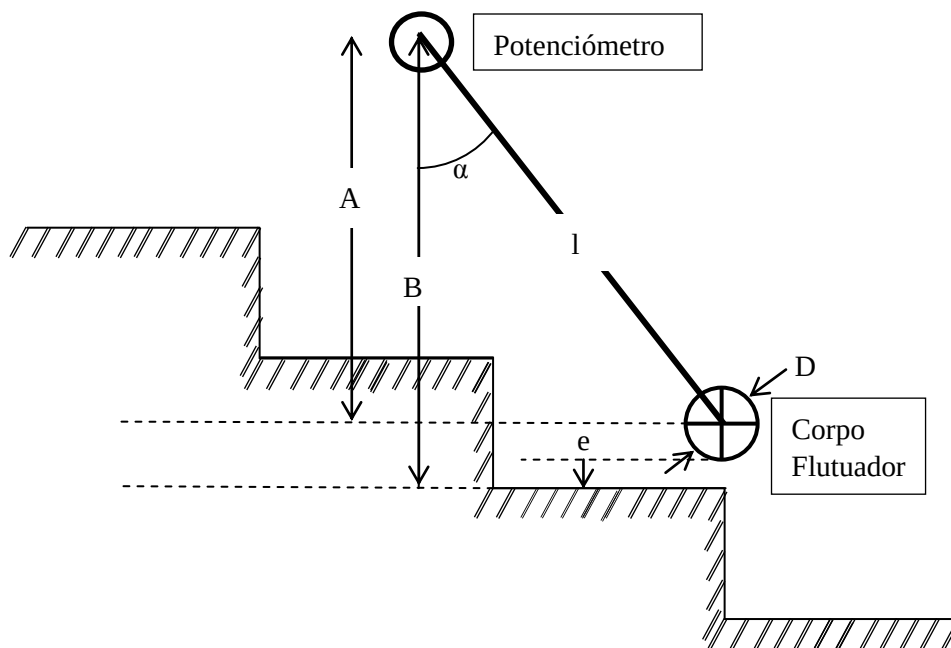


Figura 3.9. Esquema das variáveis intervenientes no processo de medição das alturas de água, utilizando o corpo flutuador e dispositivo potenciômetro.

Considerando B como a altura entre a soleira do degrau e o centro de rotação do eixo do potenciômetro, l o comprimento da vareta de suporte do flutuador, d/2 o raio do flutuador, e, a distância entre o plano de referência e a superfície do flutuador, α o ângulo medido entre a posição da vareta e a vertical que passa pelo centro de rotação do potenciômetro, é possível através da expressão (3.5) determinar o ângulo α que por sua vez encontra-se relacionado com a diferença de potencial nos terminais do potenciômetro.

$$\cos(\alpha) = \frac{B - (e + \frac{d}{2})}{l} \quad (3.5)$$

3.4 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

Os equipamentos de medição utilizados foram ligados a um sistema de aquisição de dados, permitindo assim obter valores de alturas de água e de valores de caudais para cada condição de medição. O sistema de aquisição de dados utilizado é constituído por uma placa de aquisição de dados NI USB - 6009, da National Instruments. Os dados são transmitidos a um computador Intel®Pentium®CPU 3.00GHz, existente no Laboratório de Hidráulica, que utiliza o software LabView 8.6. Este software permite definir a frequência de aquisição e a dimensão das amostras. O tratamento dos dados foi posteriormente realizado no software Microsoft ©Excel. As amostras recolhidas para cada medição permitiram a obtenção de valores médios da variável em causa nessa medição e dos correspondentes valores das suas flutuações, traduzidos pelos seu desvio padrão ou pelo vulgarmente denominado valor

R.M.S. (“root mean square”), isto é, raiz quadrada da média dos quadrados dos valores das flutuações, dada pela expressão (3.6).

$$R.M.S. = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N x_i^2}{N}} \quad (3.6)$$

Na Figura 3.10 é possível visualizar o equipamento utilizado na aquisição de dados.



Figura 3.10. Sistema de aquisição de dados.

3.5 CALIBRAÇÃO DE EQUIPAMENTOS

3.5.1 CALIBRAÇÃO DO MEDIDOR DE CAUDAIS

O medidor de caudais que foi utilizado foi alvo de diversas calibrações no âmbito de actividades desenvolvidas no Laboratório de Hidráulica e Recursos Hídricos e Ambiente, as quais permitiram obter uma recta de calibração fiável, a qual foi fornecida e aplicada ao presente caso de estudo.

Quadro.3.2 Dados relativos à calibração do medidor de caudais.

Sinal	Desvio Padrão	Volume	Δt	Caudal
[Volt]	[Volt]	[L]	[s]	[L/s]
1.27	0.004	40	116.39	0.343
1.54	0.003	70	132.58	0.527
1.77	0.005	70	98.31	0.712
1.85	0.006	70	88.96	0.786
2.16	0.008	70	66.45	1.053

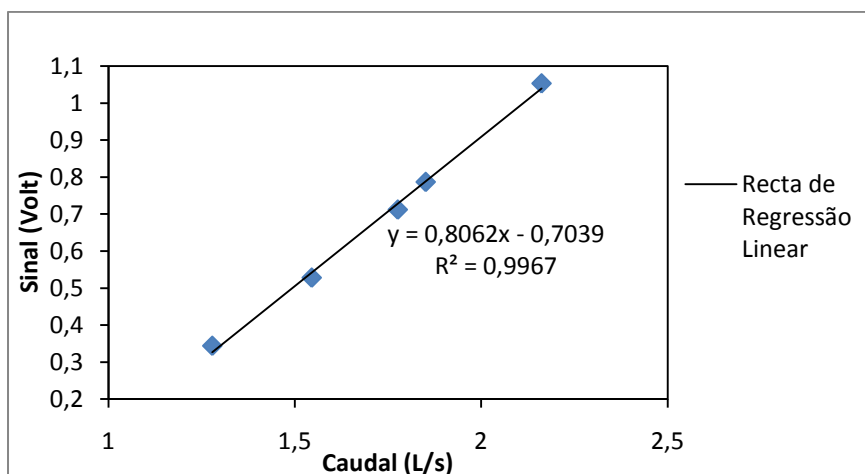


Figura 3.11. Recta de calibração do dispositivo medidor de caudais.

3.5.2 CALIBRAÇÃO DO SISTEMA DE FLUTUADOR/POTENCIÓMETRO

O processo de calibração do flutuador é um passo fundamental para um trabalho preciso e rigoroso, uma vez que esta técnica permite determinar com rapidez a altura de água em cada degrau.

A calibração realiza-se a seco, com o auxílio de placas de perspex de espessura conhecida colocadas em cada degrau para simular uma altura de água constante (Figura 3.12). O sistema de flutuador/potenciómetro foi posicionado em cada degrau ao longo do eixo longitudinal do descarregador e de tal forma que o eixo do corpo flutuador se situasse na extremidade do degrau. A Calibração do dispositivo flutuador/potenciómetro foi efectuada tendo em atenção o efeito da variação de caudal escoado na posição do corpo flutuador dado que para alturas de água substancialmente diferentes, a rotação do corpo flutuador em torno do potenciómetro, provoca uma variação da posição na vertical do corpo flutuador face ao degrau alterando, consequentemente, a posição de medição da altura de água desejada.

Como tal, para cada degrau foram consideradas duas posições de colocação do dispositivo associadas a uma determinada gama de caudais, de tal forma que o corpo flutuador tivesse o seu eixo no ponto de medição desejado. Como caudal de referência para aplicação das duas situações de calibração adoptou-se o caudal de ensaio 1.20 L/s.



Figura 3.12. Calibração do dispositivo flutuador/potenciómetro, com a aplicação de placas em perspex de diferentes alturas.

Para cada posição de calibração determina-se um valor das variáveis A e B, cujo valor deverá ser registado. As variáveis correspondem às alturas medidas perpendicularmente à soleira do degrau, sendo que A representa a distância entre o centro de rotação e o centro de massa do corpo flutuador e B a distância entre o centro de rotação e a soleira do degrau.

Processo de calibração passa pelas seguintes etapas:

- Ajuste do sistema de flutuador/potenciómetro à posição desejada;
- Medição do parâmetro B com auxílio de uma régua e um nível;
- Aplicação das placas de perspex de espessura conhecida na soleira do degrau;
- Leitura do sinal obtido pelo potenciómetro tendo sido consideradas amostras de 500 valores;
- Repetição dos pontos c) e d) para novas placas de perspex de diferentes espessuras.

Para cada amostragem é realizada uma média do valor do sinal transmitido pelo potenciómetro e relacionado com o valor do ângulo α correspondente à altura de placa em análise. A recta de calibração será uma recta do tipo $\alpha = f(U)$. Conhecendo as rectas é então possível encontrar as alturas de água, através da expressão (3.6), cujos parâmetros encontram-se referenciados no Subcapítulo 3.3.2.

$$e = B - l * \cos(\alpha) - d/2 \quad (3.6)$$

As rectas obtidas pelo processo de calibração para cada degrau e para as duas posições anteriormente explicadas encontram-se no Anexo I.

A operação de calibração é feita apoiando o corpo flutuador nas placas de Perspex, pelo que no momento de aplicação das rectas de calibração encontradas ao caso real para obtenção das alturas de água, a sua aplicação directa não é viável, uma vez que não entra em linha de conta com a submergência do corpo flutuador, originando assim erros nas avaliações feitas. Como tal, procedeu-se a uma correcção do valor calculado pela expressão (3.6) que se traduz em adicionar ao valor calculado, o valor da submergência. O valor da submergência foi determinado experimentalmente e verificou-se ser de 6.5 mm. Na Figura 3.13 é possível verificar a existência da submergência do flutuador durante o escoamento.

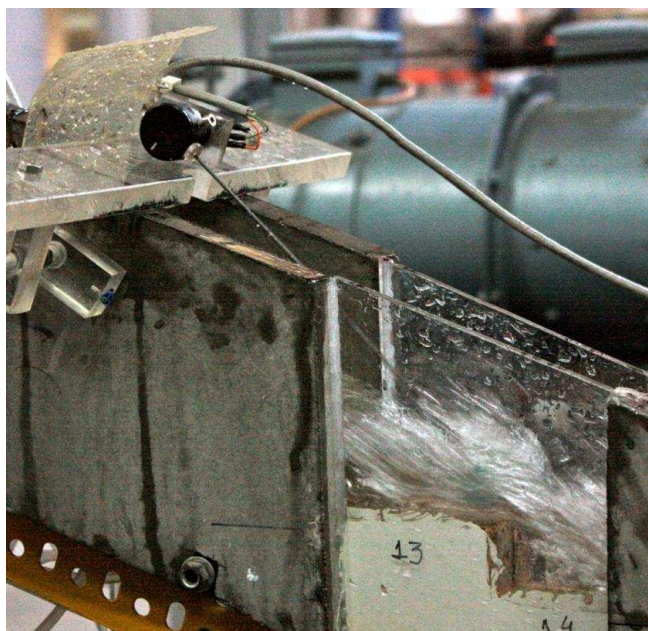


Figura 3.13. Pormenor da submergência registada na aplicação do método flutuador/potenciómetro, para um dado regime de escoamento.

3.6 CONDIÇÕES DE ESCOAMENTO NO TRABALHO EXPERIMENTAL.

Os caudais médios que foram elemento de ensaio partiram dos valores anteriormente ensaiados por Ferreira (2009), com os quais se pretendeu abranger o máximo de situações possíveis de escoamento e fazer um estudo comparativo do funcionamento dos dois tipos de descarregador de cheias em degraus.

Os valores de ensaio encontram-se representados no Quadro 3.3, assim como os correspondentes valores de caudal médio em protótipo.

Quadro 3.3. Caudal médio, ensaiado no modelo e correspondentes valores no protótipo.

	Caudal Médio Ensaiado									
Modelo [L/s]	0.25	0.50	0.82	1.05	1.24	1.50	1.69	1.92	2.19	2.29
Protótipo [m ³ /s]	2.53	5.06	8.30	10.63	12.55	15.18	17.10	19.43	22.16	23.17

4

ANÁLISE DE DADOS E RESULTADOS EXPERIMENTAIS

4.1 NOÇÕES INTRODUTÓRIAS

No presente capítulo apresentam-se os resultados obtidos no âmbito do trabalho laboratorial desenvolvido, utilizando as técnicas laboratoriais mencionadas no capítulo 3, assim como a análise crítica dos mesmos, com o fim de permitir uma melhor compreensão dos fenómenos característicos do escoamento em descarregadores de cheia em degraus.

Os trabalhos experimentais, realizados para diferentes condições de escoamento, permitiram observar os regimes de escoamento ocorrentes nos diversos casos, determinar as alturas médias de água ao longo do canal descarregador, assim como avaliar as velocidades médias e energias de escoamento o que possibilitou a avaliação da dissipação de energia ao longo da estrutura. Os resultados foram comparados com os obtidos por Ferreira (2009), o qual apresentou um estudo sobre a mesma temática sobre um descarregador de características geométricas idênticas mas com paredes de elevada rugosidade.

Foram igualmente comparados dos resultados obtidos com as propostas de vários autores referidos no capítulo 2, no que diz respeito a regimes de escoamento e valores de dissipação de energia. De notar que nem todos os autores estudaram os fenómenos hidráulicos associados a este tipo de descarregadores para semelhantes ao presente estudo, o que impossibilita a sua comparação com resultados obtidos.

As limitações técnicas e tempo disponível para o presente estudo impediram que se alargasse a análise à análise do emulsionamento de ar ao longo do escoamento, a qual foi alvo de referência no capítulo 2.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DO ESCOAMENTO

4.2.1 REGIMES DE ESCOAMENTO

Como apresentado no capítulo 2, existem três tipos distintos de escoamento: escoamento em quedas sucessivas, escoamento de transição e escoamento deslizante sobre turbilhões (respectivamente EQS, TRA e EDT). Os regimes de escoamento verificados ao longo do descarregador foram avaliados por observação, com base nas características de escoamento referenciadas.

A visualização foi dificultada pela existência de paredes em betão, o que fez com que o local de mudança de regime de escoamento possa ter ocorrido algum com desfasamento em relação ao aqui descrito.

Na Figura 4.1 a), b) e c) é possível visualizar os três tipos de escoamento observados neste tipo de descarregadores. O degrau representado apresenta uma altura (H) de 3.8 cm no modelo.

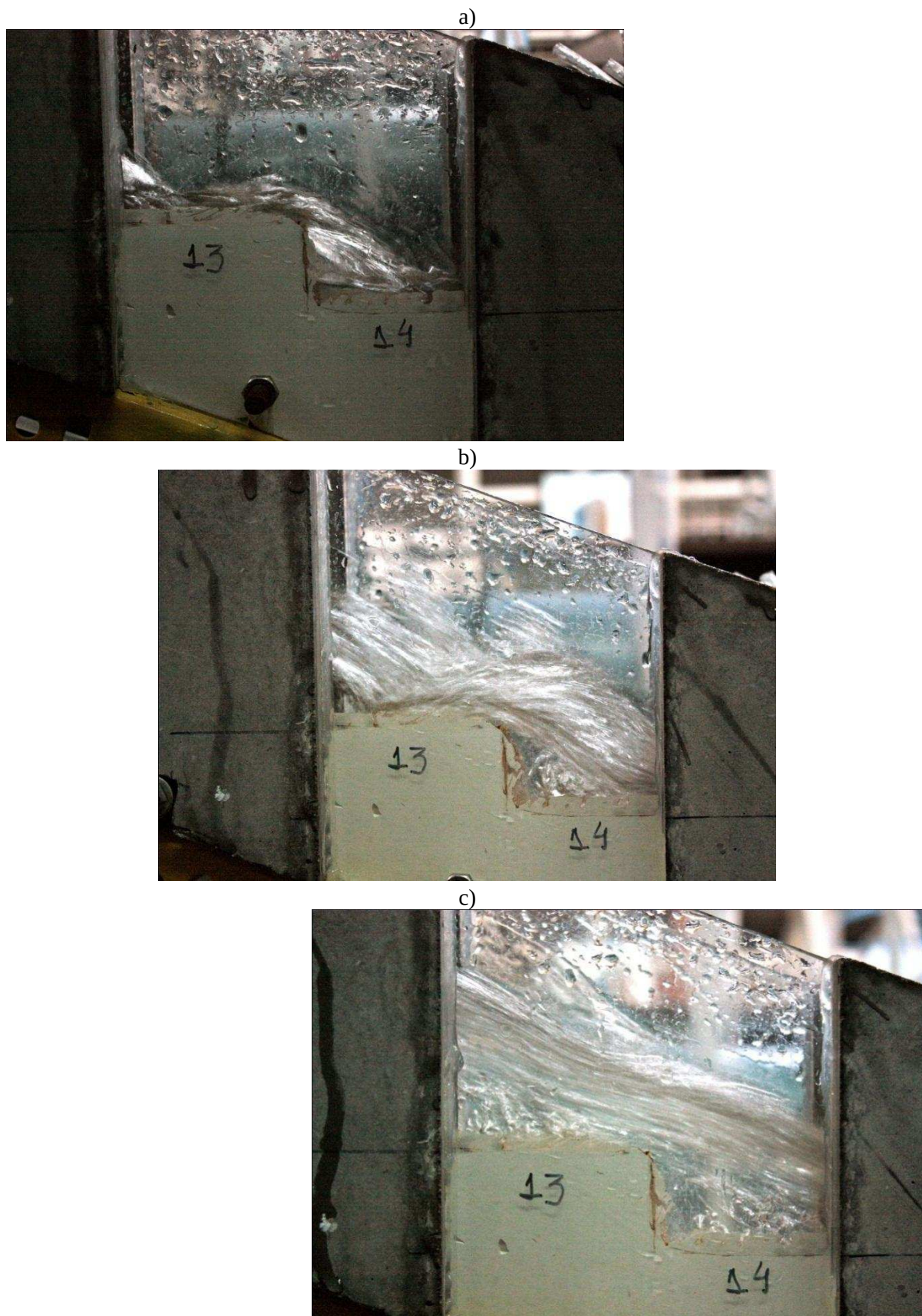


Figura 4.1. Regimes de escoamento registados: a) Escoamento em quedas sucessivas; b) Escoamento de transição; c) Escoamento deslizante sobre turbilhões.

Na Figura 4.2 encontram-se representados, de forma esquemática, os regimes de escoamento verificados experimentalmente no presente estudo. Para cada caudal médio ensaiado estão indicadas as mudanças de regime de escoamento observadas para cada degrau. Verifica-se a existência de 3 zonas distintas de escoamento, nomeadamente escoamento em quedas sucessivas (EQS), escoamento de transição (TRA) e escoamento deslizante sobre turbilhões (EDT). De notar que com o aumento do caudal escoado, a zona referente ao escoamento em quedas sucessivas vai diminuindo e a zona de escoamento deslizante sobre turbilhões aumenta.

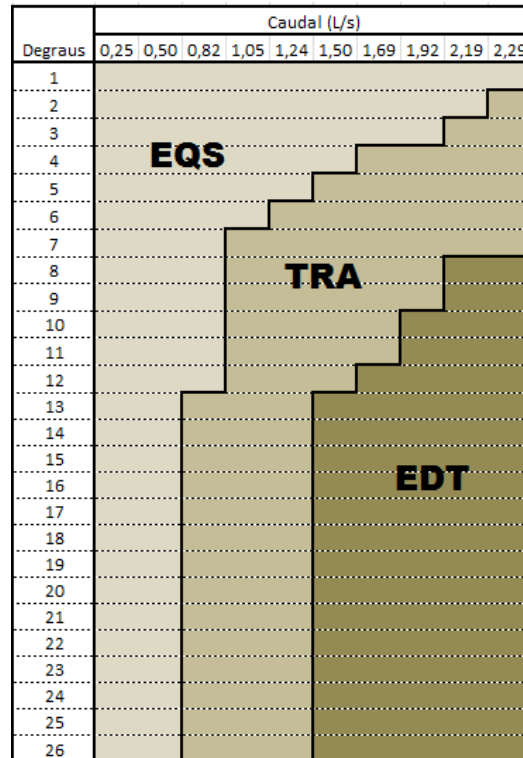


Figura 4.2. Esquema representativo dos regimes de escoamento observados ao longo do canal descarregador

4.2.2 ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE O DESCARREGADOR EM ESTUDO E O DESCARREGADOR DE RUGOSIDADE ELEVADA, FERREIRA (2009)

Similarmente ao constatado por Ferreira (2009) nos ensaios no descarregador de paredes rugosas, à medida que o caudal aumenta, verifica-se no presente estudo que a mudança de regime de escoamento ocorre para degraus situados mais a montante na secção de estreitamento. Na zona do canal de largura constante (secções a jusante do degrau 13) o escoamento tende a atingir uma zona de escoamento constante.

Na Figura 4.3, encontra-se representado a tracejado, o limite de passagem de escoamento em quedas sucessivas para escoamento deslizante sobre turbilhões verificado no estudo de Ferreira (2009). O início do escoamento deslizante sobre turbilhões para o descarregador em degraus com rugosidade superior, acontece para caudais mais baixos e para degraus mais a montante do que no descarregador geometricamente semelhante com rugosidade mais baixa, objecto deste estudo.

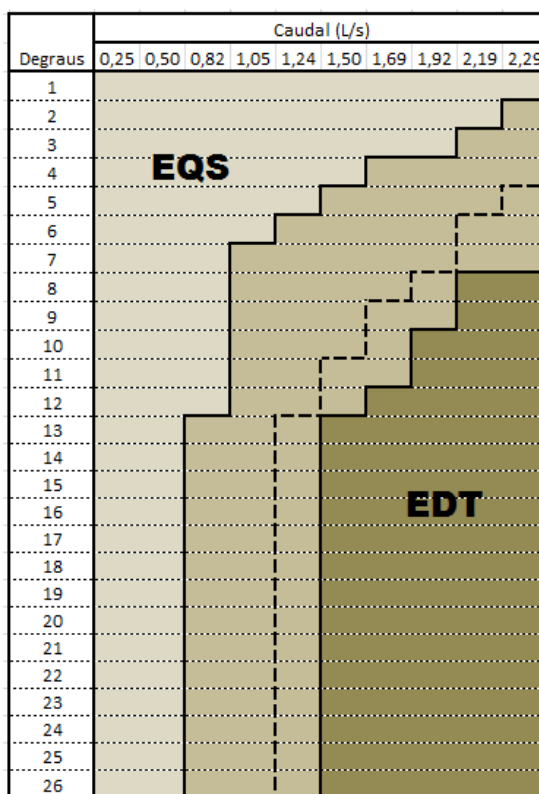


Figura 4.3. Quadro comparativo da análise qualitativa dos regimes de escoamento entre descarregador em degraus convergente com e sem rugosidade.

Da comparação com o observado por Ferreira (2009) no estudo de um de um descarregador com rugosidade superior com o encontrado no presente estudo verifica-se que o escoamento deslizante sobre turbilhões é atingido para caudais mais baixos no descarregador com rugosidade superior.

O referido autor para o caudal médio ensaiado 1.24 L/s verifica a existência de escoamento deslizante sobre turbilhões enquanto que no presente caso o escoamento deslizante sobre turbilhões só se verifica para 1.50 L/s.

4.2.3 ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS LIMITES DE OCORRÊNCIA DOS REGIMES DE ESCOAMENTO OBTIDOS EXPERIMENTALMENTE E OS PROPOSTOS POR DIVERSOS AUTORES

Nesta subsecção os regimes de escoamento obtidos são comparados com os dados recolhidos da bibliografia sobre o tema, referidos no Capítulo 2.

Fael (2000), Chanson (2001), Ohtsu et al (2001), Fael e Pinheiro (2006) e Chanson and Toombes (2004) estudaram os limites de ocorrência dos diversos tipos de escoamento em função da relação hc/H , por sua vez calculados para cada tipo de descarregador em função da relação H/L , em que H é a altura do degrau, L o comprimento do mesmo e hc a altura crítica do escoamento.

Dos limites apresentados não serão alvo de comparação os estudos efectuados por Fael e Pinheiro (2003) e Ohtsu et al (2004) uma vez que os referidos autores apresentam limites para sub-regimes de escoamento, os quais, para serem distinguidos no presente estudo seria necessário a existência de paredes laterais totalmente transparentes que permitissem uma observação mais pormenorizada do escoamento.

Aplicando as diversas propostas ao descarregador em estudo ($H=0.038$ m e $L=0.0996$ m), é possível encontrar pontos fronteira para os diversos limites, os quais se encontram indicados no Quadro 4.1. Com base nesses pontos, foi possível relacionar o esperado pelas propostas dos diversos autores para a mudança de regime de escoamento com o observado no presente estudo e apresentado no subcapítulo 4.2.1.

Quadro 4.1. Valores limite de ocorrência dos diversos tipos de escoamento aplicados ao caso em estudo.

Referências	Expressões (Capítulo 2)	EQS	TRA	EDT
		hc/H para $H/L = 0.382$		
Chanson and Toombes (2004)	2.11	*	1.086	*
	2.12	*	0.772	*
Fael e Pinheiro (2006)	2.5	0.620	*	*
	2.10		*	0.944
Chanson (2001)	2.4	0.737	*	
	2.8		*	1.076
Ohtsu et al (2001)	2.2	0.751	*	
	2.7		*	1.144
Fael (2000)	2.1	1.076	*	
	2.6		*	0.313

No Quadro 4.2 apresentam-se os valores da altura crítica do escoamento, hc , para os caudais ensaiados. O cálculo da altura crítica foi efectuado através da condição de regime crítico ao longo de um canal a qual é atingida quando n° de Froude (Fr) é igual a unidade. Com base nesse pressuposto e considerando que o regime de escoamento é bifásico, foi efectuado o cálculo da altura crítica, na secção onde foram efectuadas as medições da altura média de água, como explicado no capítulo 3, através da aplicação da expressão (4.1).

Através da expressão (4.1), permite calcular para cada degrau i e caudal Q_j , a relação entre o caudal (Q_j) a largura da secção em causa (B_i) e a aceleração da gravidade (g) que representa o valor de hc_i referente à situação em análise.

$$hc_i = \sqrt[3]{\frac{Q_j^2}{B_i^2 \times g}} \quad (4.1)$$

Quadro 4.2. Valores para a altura crítica da lâmina líquida em cada degrau.

Degraus	hc (m)									
	Caudal (L/s)									
	0.25	0.50	0.82	1.05	1.24	1.50	1.69	1.92	2.19	2.29
1	0.007	0.011	0.015	0.018	0.020	0.023	0.024	0.027	0.029	0.030
2	0.007	0.011	0.016	0.018	0.021	0.023	0.025	0.028	0.030	0.031
3	0.007	0.012	0.016	0.019	0.021	0.024	0.026	0.029	0.031	0.032
4	0.008	0.012	0.017	0.020	0.022	0.025	0.027	0.030	0.033	0.034
5	0.008	0.013	0.018	0.021	0.023	0.026	0.029	0.031	0.034	0.035
6	0.008	0.013	0.019	0.022	0.024	0.028	0.030	0.033	0.036	0.037
7	0.009	0.014	0.020	0.023	0.026	0.029	0.032	0.034	0.038	0.039
8	0.009	0.015	0.021	0.024	0.027	0.031	0.033	0.036	0.040	0.041
9	0.010	0.016	0.022	0.026	0.029	0.033	0.035	0.039	0.042	0.043
10	0.011	0.017	0.024	0.028	0.031	0.035	0.038	0.041	0.045	0.046
11	0.011	0.018	0.025	0.030	0.033	0.038	0.041	0.044	0.048	0.050
12	0.012	0.020	0.028	0.032	0.036	0.041	0.044	0.048	0.053	0.054
13	0.014	0.022	0.030	0.035	0.040	0.045	0.049	0.053	0.058	0.060
14	0.014	0.022	0.030	0.036	0.040	0.045	0.049	0.053	0.058	0.060
15	0.014	0.022	0.030	0.036	0.040	0.045	0.049	0.053	0.058	0.060
16	0.014	0.022	0.030	0.036	0.040	0.045	0.049	0.053	0.058	0.060
17	0.014	0.022	0.030	0.036	0.040	0.045	0.049	0.053	0.058	0.060
18	0.014	0.022	0.030	0.036	0.040	0.045	0.049	0.053	0.058	0.060
19	0.014	0.022	0.030	0.036	0.040	0.045	0.049	0.053	0.058	0.060
20	0.014	0.022	0.030	0.036	0.040	0.045	0.049	0.053	0.058	0.060
21	0.014	0.022	0.030	0.036	0.040	0.045	0.049	0.053	0.058	0.060
22	0.014	0.022	0.030	0.036	0.040	0.045	0.049	0.053	0.058	0.060
23	0.014	0.022	0.030	0.036	0.040	0.045	0.049	0.053	0.058	0.060
24	0.014	0.022	0.030	0.036	0.040	0.045	0.049	0.053	0.058	0.060
25	0.014	0.022	0.030	0.036	0.040	0.045	0.049	0.053	0.058	0.060
26	0.014	0.022	0.030	0.036	0.040	0.045	0.049	0.053	0.058	0.060

Na Figura 4.4 é possível visualizar os valores de hc/H referentes ao modelo ensaiado.

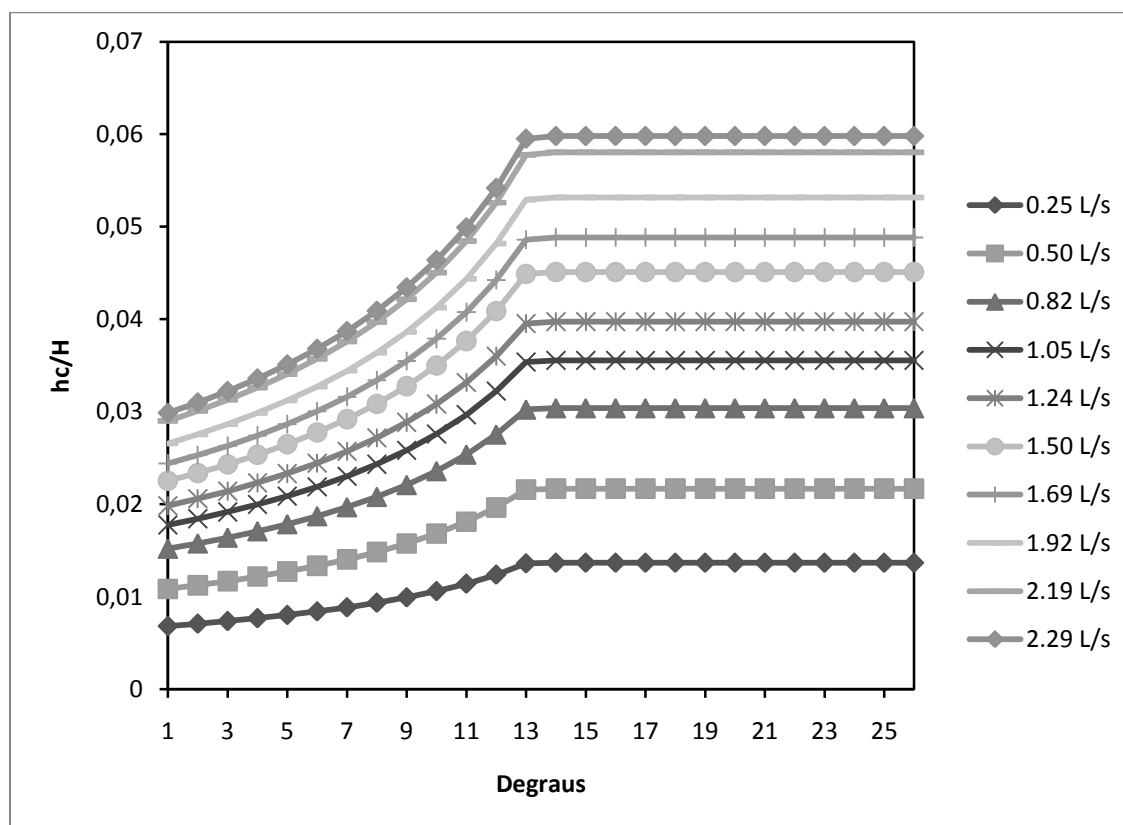


Figura 4.4. Valores de hc/H referentes ao modelo ensaiado.

Tendo em atenção as características de escoamento em estudo, os valores calculados de hc/H e os limites de ocorrência dos diferentes tipos de escoamento sugeridos pelos diferentes autores, apresentam-se nas Figura 4.5 a Figura 4.9 a comparação entre as características observadas e as previstas pelos diferentes autores para o presente estudo.

Da Figura 4.5 à Figura 4.9 a notação proposta representa respectivamente, a sombreado cinzento, azul e vermelho os regimes obtidos experimentalmente com as características de escoamento deslizante sobre turbilhões, escoamento de transição e escoamento deslizante sobre turbilhões. A linha representa os limites propostos pelos diversos autores referenciados (Quadro 4.1) aplicados ao caso em estudo, com base na relação hc/H apresentada na Figura 4.4. Os valores apresentados graficamente na Figura 4.4 encontram-se no Anexo II (Quadro II.2).

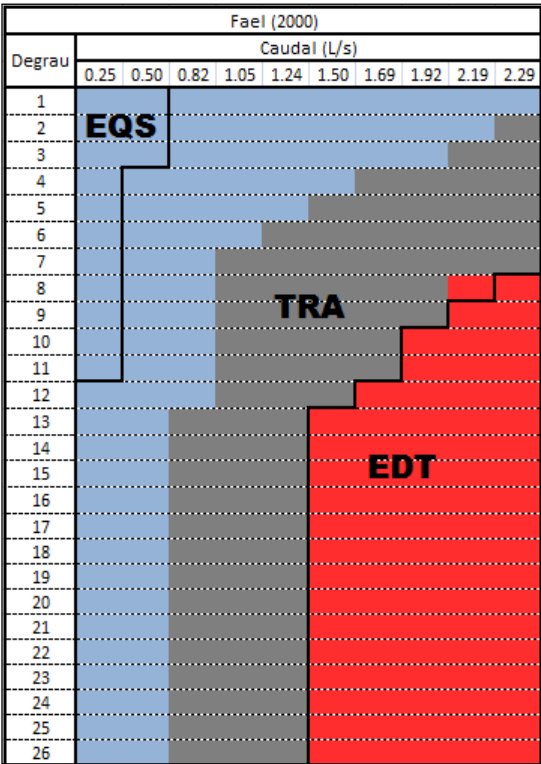


Figura 4.5. Limite de ocorrência experimental e linhas limite de ocorrência proposto por Fael (2000).

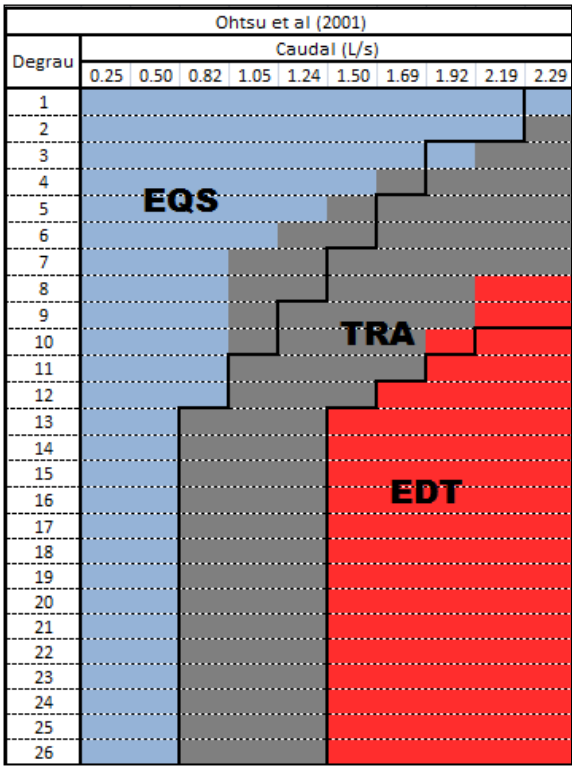


Figura 4.6. Limite de ocorrência experimental e linhas limite de ocorrência proposto por Ohtsu et al (2001).

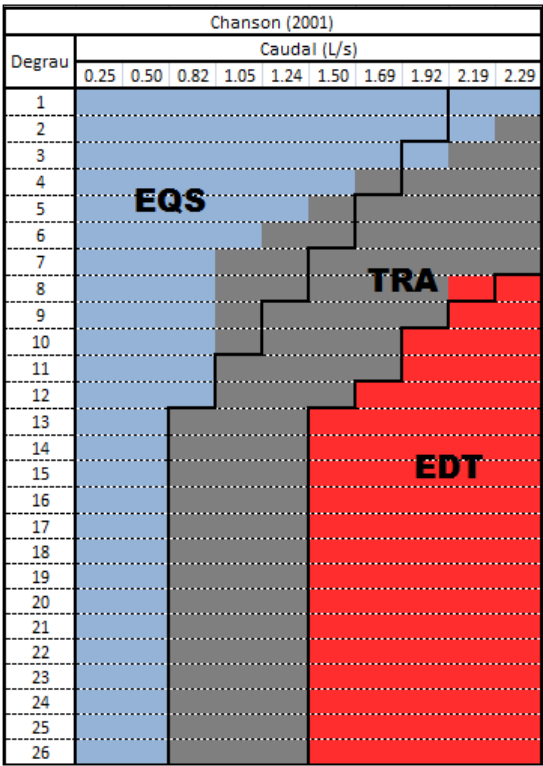


Figura 4.7. Limite de ocorrência experimental e linhas limite de ocorrência proposto por Chanson (2001).

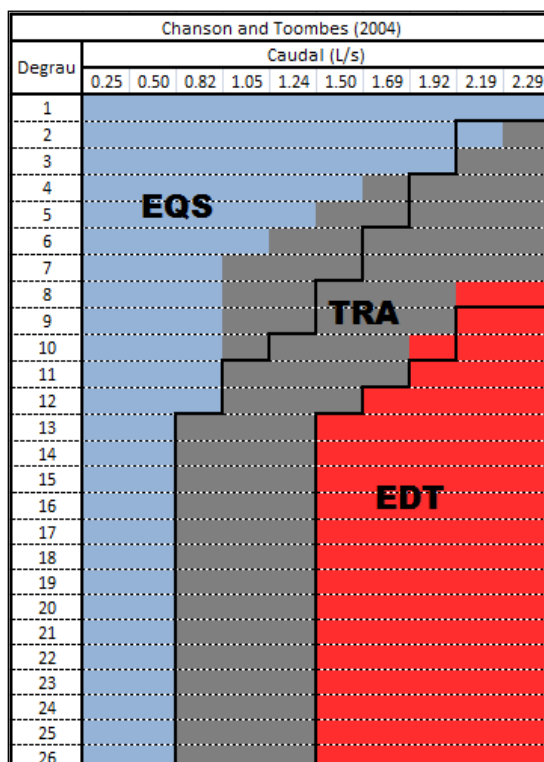


Figura 4.8. Limite de ocorrência experimental e linhas limite de ocorrência proposto por Chanson and Toombes (2004).

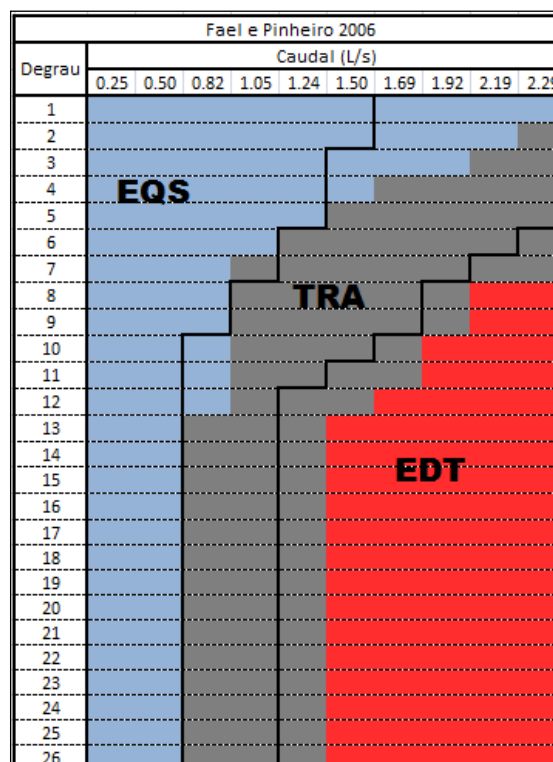


Figura 4.9. Limite de ocorrência experimental e limite de ocorrência teórico proposto por Fael e Pinheiro (2006).

Dos limites propostos pelos diversos autores e dos verificados na prática é possível constatar que o regime em quedas sucessivas verifica-se, para os caudais mais baixos, mais a montante do que o esperado. Com exceção da proposta por Fael e Pinheiro (2006), observa-se para este tipo de descarregadores, a existência de uma zona inferior de escoamento em quedas sucessivas para caudais intermédios. Quanto ao escoamento deslizante sobre turbilhões é possível constatar que praticamente todas as propostas apresentam o mesmo limite de ocorrência, para além de serem bastante semelhantes aos limites encontrados no trabalho experimental.

Podemos concluir que para descarregadores em degraus com troço convergente a mudança de regime de escoamento, para caudais mais baixos com regime de escoamento maioritariamente escoamento em quedas sucessivas, é aproximada à verificada pelas propostas apresentadas. Para caudais intermédios, com regime de escoamento maioritariamente de transição, a passagem de regime escoamento em quedas sucessivas para escoamento de transição acontece para degraus situados mais a montante do que o esperado pelas propostas (descarregadores de largura constante). Por fim para caudais elevados, cujo regime de escoamento é maioritariamente EDT, os limites teóricos são muito aproximados aos verificados experimentalmente, independentemente de o descarregador ser ou não convergente

4.3 ALTURAS DE ÁGUA

As alturas de água, foram obtidas através das metodologias experimentais apresentadas no capítulo 3. Devido a dificuldades técnicas, o degraú 2 e 15 não foram alvo de estudo, uma vez que as paredes onde seria colocado o dispositivo, em perspex, apresentavam alguma fragilidade, levando à formação de uma deformação das paredes do canal, a qual influenciava de forma significativa as medições. De igual forma, algumas imperfeições existentes no descarregador e a mudança de material (betão/perspex) conduziram a algumas variações das alturas de água que não seriam de esperar. Como

tal procedeu-se a uma análise cuidada dos valores registados, dos quais foram eliminadas as leituras que se consideraram desacertadas face às restantes.

O degrau 1 não foi tratado da mesma forma que os restantes degraus, uma vez que por impossibilidade técnica de medição das alturas de água através do dispositivo potenciómetro/flutuador optou-se por uma medição directa através das tomadas de pressão previamente instaladas. A medição directa, como anteriormente explicado, passa por medir a diferença de altura de água entre o degrau e a superfície livre no tubo piezómetro. Os valores medidos são referentes à tomada de pressão mais a jusante no degrau. Na Figura 4.10 é possível visualizar as tomadas de pressão e os tubos piezómetros referentes ao degrau 1.



Figura 4.10. Tomadas de pressão existente no degrau 1 (pormenor superior e tubos piezométricos laterais).

Foi verificada uma diferença pouco significativa de alturas de água entre as duas tomadas existentes no degrau, tanto maior quanto maior o caudal escoado.

A altura de água registada, teoricamente deverá aproximar-se da altura de água crítica no primeiro degrau, uma vez que a passagem de escoamento lento para rápido se dá ao longo da superfície de descarga. No Quadro 4.3 é possível visualizar os valores das alturas de água médias registadas (h_m) e a altura de água crítica na secção da tomada de pressão mais a jusante (h_c). Verifica-se que para os caudais mais baixos as diferenças entre as duas alturas são mais significativas. De notar que o descarregador em estudo é convergente originando variações nas alturas esperadas.

Quadro 4.3. Alturas de água referentes ao degrau 1.

Caudal [L/s]	0.25	0.50	0.82	1.05	1.24	1.50	1.69	1.92	2.19	2.29
h_c [m]	0.007	0.011	0.015	0.018	0.020	0.023	0.024	0.027	0.029	0.030
h_m [m]	0.015	0.020	0.020	0.019	0.022	0.025	0.027	0.028	0.030	0.032

Apresenta-se na Figura 4.11 os valores da altura média de água, registada ao longo do descarregador para todos os degraus avaliados, sendo que do degrau 3 ao 26 as leituras foram efectuadas através do método flutuador/potenciómetro. Foram eliminados os valores não conformes.

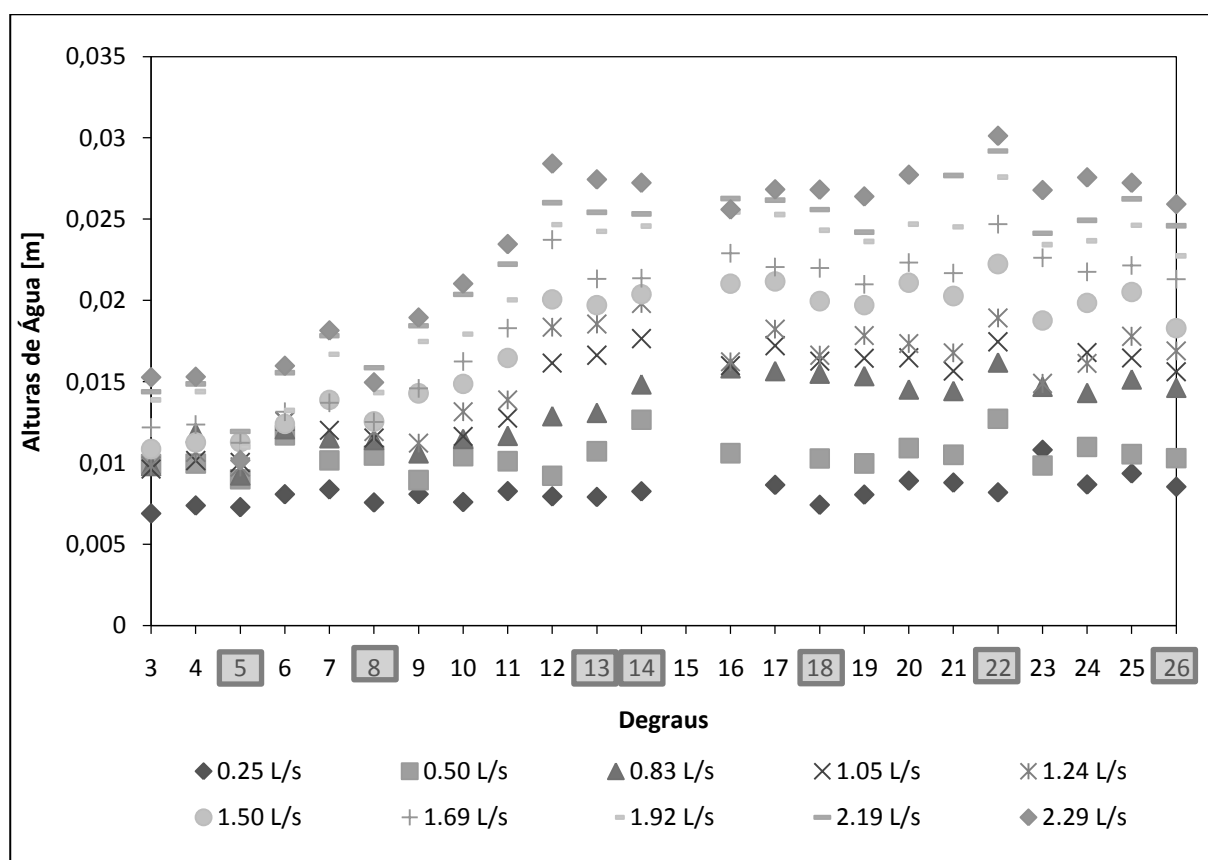


Figura 4.11. Alturas de água registadas experimentalmente para cada caudal ensaiado

No Quadro 4.4 apresentam-se os valores médios das alturas de água registadas ao longo do descarregador para os diferentes caudais ensaiados, hm.

Quadro 4.4. Valores das alturas médias de água registadas experimentalmente no presente estudo.

Degraus	Alturas de água (hm) [m]									
	Caudal [L/s]									
	0.25	0.50	0.83	1.05	1.24	1.50	1.69	1.92	2.19	2.29
1	0.015	0.020	0.020	0.019	0.022	0.025	0.027	0.028	0.030	0.032
2	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
3	0.007	0.010	0.010	0.010	0.010	0.011	0.012	0.014	0.014	0.015
4	0.007	0.010	0.012	0.010	0.011	0.011	0.012	0.014	0.015	0.015
5	0.007	0.009	0.009	0.010	0.010	0.011	0.011	0.011	0.012	0.010
6	0.008	0.012	0.012	0.013	0.013	0.012	0.013	0.013	0.016	0.016
7	0.008	0.010	0.012	0.012	0.009	0.014	0.014	0.017	0.018	0.018
8	0.008	0.010	0.011	0.012	0.012	0.013	0.013	0.014	0.016	0.015

Degraus	Alturas de água (hm) [m]									
	Caudal [L/s]									
	0.25	0.50	0.83	1.05	1.24	1.50	1.69	1.92	2.19	2.29
9	0.008	0.009	0.011	0.014	0.011	0.014	0.015	0.017	0.018	0.019
10	0.008	0.010	0.011	0.012	0.013	0.015	0.016	0.018	0.020	0.021
11	0.008	0.010	0.012	0.013	0.014	0.016	0.018	0.020	0.022	0.023
12	0.008	0.009	0.013	0.016	0.018	0.020	0.024	0.025	0.026	0.028
13	0.008	0.011	0.013	0.017	0.019	0.020	0.021	0.024	0.025	0.027
14	0.008	0.013	0.015	0.018	0.020	0.020	0.021	0.025	0.025	0.027
15	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
16	0.013	0.011	0.016	0.016	0.016	0.021	0.023	0.025	0.026	0.026
17	0.009	0.016	0.016	0.017	0.018	0.021	0.022	0.025	0.026	0.027
18	0.007	0.010	0.016	0.016	0.017	0.020	0.022	0.024	0.026	0.027
19	0.008	0.010	0.015	0.016	0.018	0.020	0.021	0.024	0.024	0.026
20	0.009	0.011	0.015	0.016	0.017	0.021	0.022	0.025	0.030	0.028
21	0.009	0.011	0.014	0.016	0.017	0.020	0.022	0.025	0.028	0.014
22	0.008	0.013	0.016	0.017	0.019	0.022	0.025	0.028	0.029	0.030
23	0.011	0.010	0.015	0.013	0.015	0.019	0.023	0.023	0.024	0.027
24	0.009	0.011	0.014	0.017	0.016	0.020	0.022	0.024	0.025	0.028
25	0.009	0.011	0.015	0.016	0.018	0.021	0.022	0.025	0.026	0.027
26	0.009	0.010	0.015	0.016	0.017	0.018	0.021	0.023	0.025	0.026

Numa primeira análise, é possível verificar que a altura de água, crescente com o aumento do caudal, apresenta, um crescimento mais significativo até ao degrau 12. Tal situação deve-se essencialmente à configuração do descarregador, visto que do degrau 1 até ao degrau 13 o descarregador apresenta secção de largura variável (convergente), conduzindo a um aumento da altura de média de água pela diminuição da secção.

Os degraus, identificados na Figura 4.11 pelo sombreado cinzento, apresentam as paredes laterais em perspex o que faz com que as leituras registadas sofram algumas perturbações, quer pela diferença de rugosidade que pelas imperfeições resultantes da mudança de material. No degrau 5, verifica-se um decréscimo da altura média de água do escoamento resultante da alteração de material das paredes do canal. Contudo para os restantes degraus essa alteração não é tão notória. No degrau 8 as alterações registadas são devidas a um pequeno alargamento da secção que faz com que a altura de água diminua, só sendo realmente relevante quando o regime de escoamento já apresenta um certo emulsionamento ar-água. Quanto ao degrau 22, a aplicação do perspex originou um estreitamento no canal, que por sua vez levou ao aumento da altura de água evidente em quase todas as gamas de caudais devido a posição do degrau no canal descarregador.

4.3.1 ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE O DESCARREGADOR EM ESTUDO E O DESCARREGADOR DE ELEVADA RUGOSIDADE, FERREIRA (2009)

No Quadro 4.5 apresentam-se os valores das alturas médias de água (hm*) encontradas por Ferreira (2009) no seu estudo num descarregador, de geometria similar ao do actual estudo, com rugosidade mais elevada.

Quadro 4.5. Alturas médias de água registadas experimentalmente no descarregador de rugosidade elevada, Ferreira (2009).

Degraus	hm* [m]									
	Caudal [L/s]									
	0.25	0.50	0.83	1.05	1.24	1.50	1.69	1.92	2.19	2.29
1	0.011	0.014	0.017	0.022	0.024	0.029	0.030	0.031	0.033	0.036
2	0.011	0.013	0.016	0.023	0.024	0.028	0.029	0.031	0.033	0.035
3	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
4	0.012	0.014	0.017	0.022	0.024	0.028	0.030	0.031	0.033	0.036
5	0.012	0.015	0.017	0.022	0.025	0.030	0.030	0.032	0.034	0.037
6	0.012	0.017	0.018	0.024	0.025	0.030	0.032	0.033	0.035	0.037
7	0.012	0.017	0.020	0.025	0.026	0.031	0.034	0.034	0.036	0.040
8	0.012	0.017	0.021	0.026	0.028	0.032	0.035	0.035	0.038	0.043
9	0.013	0.018	0.024	0.027	0.029	0.033	0.034	0.036	0.039	0.044
10	0.014	0.018	0.026	0.027	0.030	0.034	0.035	0.037	0.043	0.046
11	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
12	0.014	0.018	0.030	0.029	0.030	0.034	0.036	0.038	0.045	0.048
13	0.014	0.016	0.029	0.028	0.028	0.034	0.033	0.036	0.042	0.047
14	0.017	0.017	0.033	0.040	0.040	0.039	0.037	0.044	0.048	0.051
15	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
16	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
17	0.016	0.015	0.032	0.039	0.039	0.037	0.038	0.045	0.048	0.052
18	0.017	0.017	0.032	0.039	0.038	0.037	0.038	0.047	0.049	0.055
19	0.017	0.017	0.033	0.039	0.039	0.038	0.038	0.047	0.049	0.055
20	0.017	0.018	0.033	0.039	0.039	0.000	0.037	0.047	0.050	0.054
21	0.017	0.018	0.034	0.038	0.039	0.038	0.038	0.047	0.048	0.054
22	0.017	0.018	0.032	0.038	0.038	0.038	0.037	0.047	0.048	0.055
23	0.016	0.018	0.030	0.036	0.038	0.039	0.037	0.044	0.047	0.052
22	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
25	0.013	0.015	0.021	0.026	0.026	0.035	0.036	0.035	0.038	0.051
26	0.012	0.015	0.020	0.026	0.025	0.034	0.034	0.033	0.037	0.050

A comparação dos valores das alturas médias de água, traduzida pela razão (a) entre as alturas de água registadas experimentalmente no estudo de Ferreira (2009) (hm*) e as registadas no presente estudo (hm), é apresentada no Quadro 4.6.

Quadro 4.6. Relação, a , entre as alturas média de água registadas experimentalmente por Ferreira (2009) e as verificadas no presente estudo

Degraus	$a = h_{m^*}/h_m$									
	Caudal [L/s]									
	0.25	0.50	0.82	1.05	1.24	1.50	1.69	1.92	2.19	2.29
1	0.75	0.70	0.83	1.14	1.09	1.15	1.11	1.12	1.10	1.13
2	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
3	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
4	1.59	1.39	1.43	2.19	2.29	2.52	2.40	2.18	2.23	2.33
5	1.64	1.66	1.85	2.15	2.53	2.66	2.70	2.93	2.81	3.60
6	1.46	1.41	1.52	1.91	2.00	2.43	2.40	2.49	2.26	2.34
7	1.47	1.66	1.76	2.09	*	2.25	2.49	2.01	2.01	2.20
8	1.64	1.66	1.84	2.24	2.36	2.57	2.80	2.41	2.38	2.84
9	1.62	2.02	2.26	*	2.59	2.34	2.36	2.04	2.11	2.31
10	1.78	1.68	2.25	2.35	2.24	2.28	2.15	2.05	2.11	2.17
11	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
12	1.76	1.92	2.33	1.78	1.61	1.71	1.50	1.53	1.73	1.69
13	1.82	1.47	2.18	1.71	1.49	1.70	1.53	1.48	1.66	1.71
14	2.01	1.31	2.22	2.24	2.03	1.89	1.73	1.79	1.89	1.86
15	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
16	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
17	1.89	*	2.04	2.27	2.13	1.73	1.72	1.80	1.84	1.95
18	2.22	1.60	2.08	2.40	2.31	1.86	1.72	1.91	1.92	2.04
19	2.06	1.69	2.12	2.40	2.16	1.91	1.79	2.00	2.03	2.08
20	1.88	1.63	2.26	2.36	2.24	0.00	1.67	1.90	*	1.96
21	1.88	1.68	2.36	2.45	2.29	1.85	1.73	1.93	1.74	*
22	2.08	1.42	2.00	2.18	2.02	1.71	1.49	1.70	1.64	1.82
23	1.51	1.82	2.06	*	2.53	2.06	1.63	1.90	1.95	1.96
24	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
25	1.37	1.42	1.40	1.59	1.44	1.72	1.62	1.42	1.44	1.85
26	1.35	1.41	1.39	1.65	1.45	1.85	1.61	1.43	1.49	1.92

Nas Figura 4.12 e Figura 4.13 encontram-se representada a relação h_{m^*} e h_m representativas das alturas médias registadas nos estudos efectuados, respectivamente no estudo efectuado por Ferreira (2009) e no presente estudo.

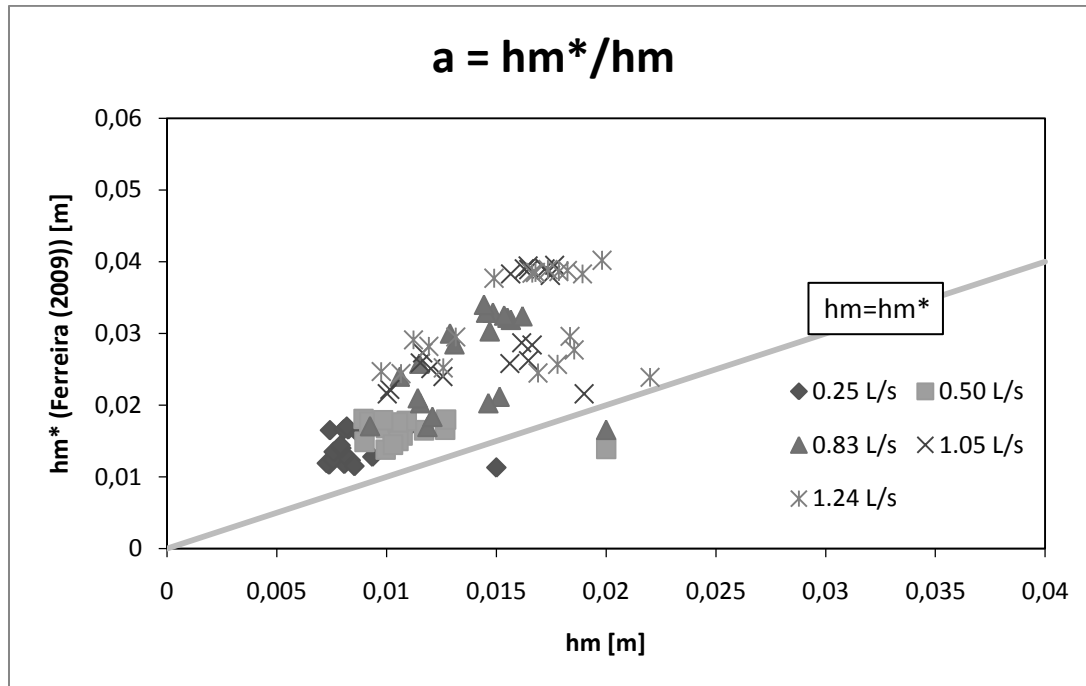


Figura 4.12. Relação, a , entre as alturas média de água registadas experimentalmente por Ferreira (2009) e as encontradas no presente estudo.

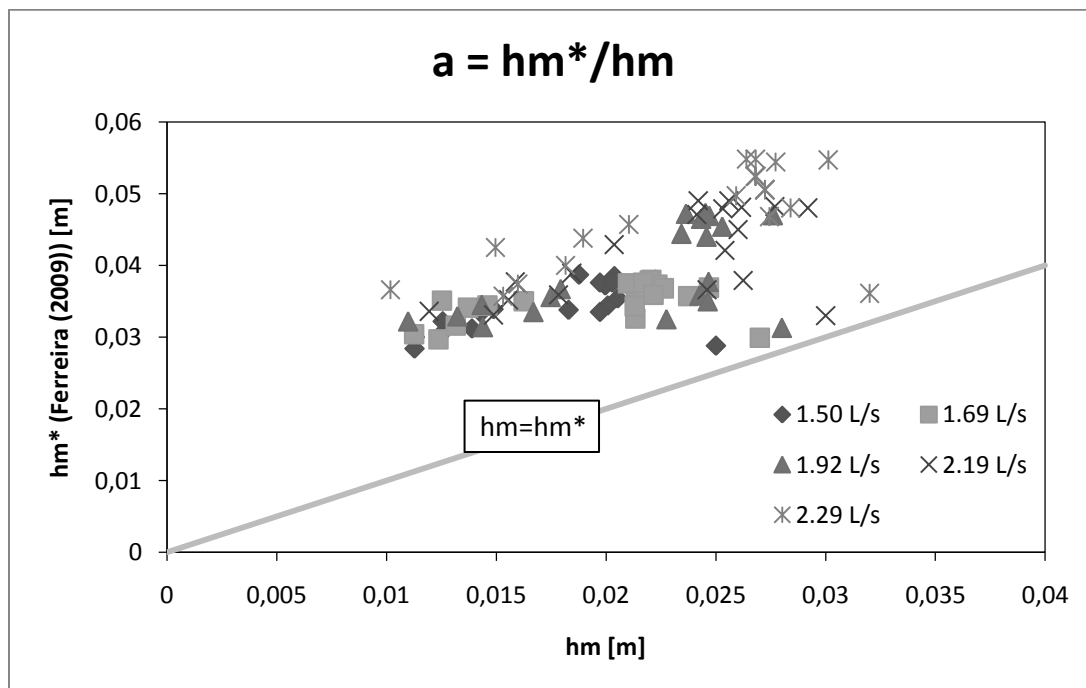


Figura 4.13. Relação, a , entre as alturas média de água registadas experimentalmente por Ferreira (2009) e as encontradas no presente estudo

Da análise comparativa entre os valores das alturas médias de água, conclui-se que os valores registados no estudo efectuado no descarregador em degraus com rugosidade superior à do presente estudo são superiores, contudo verificam-se semelhanças quanto às linhas de crescimento das alturas de água. Os registos efectuados apresentam acréscimos mais significativos na zona convergente com agravamento resultante do aumento do caudal, assim como decréscimos com a alteração da rugosidade devido às paredes em perspex.

Da relação encontrada entre as alturas médias de água registadas no descarregador com maior rugosidade e no presente, verificam-se relações a entre os dois estudos desde 1.40 a 2.60 sendo que a relação é tanto menor quanto menores forem os caudais.

4.4 VELOCIDADES

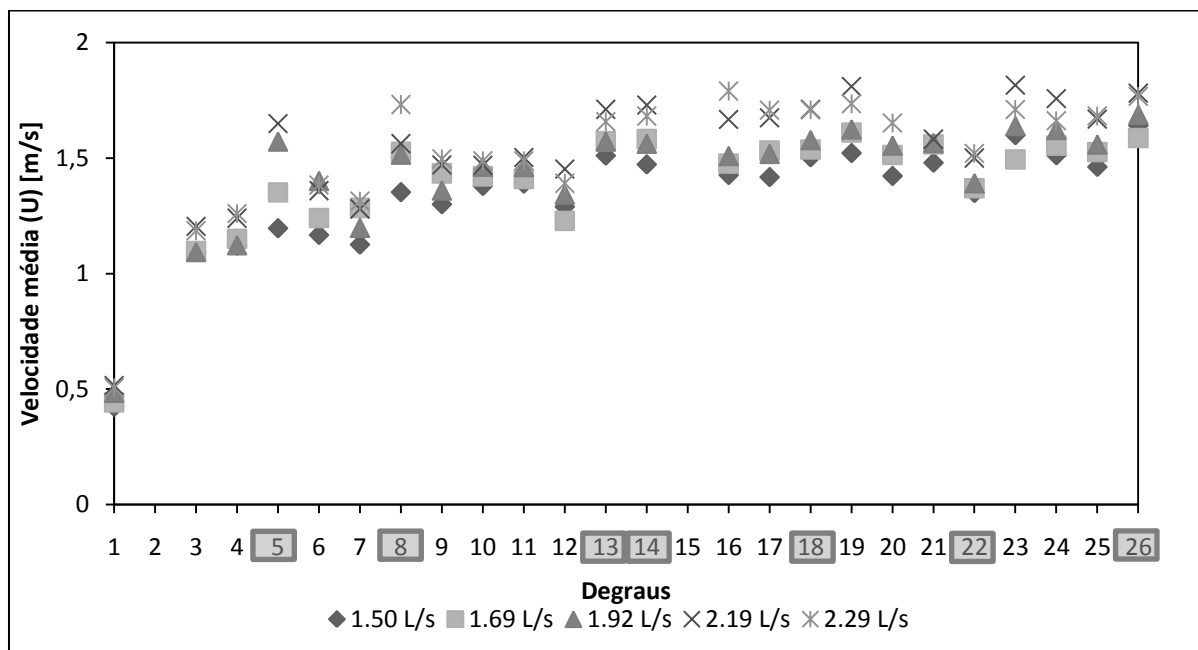
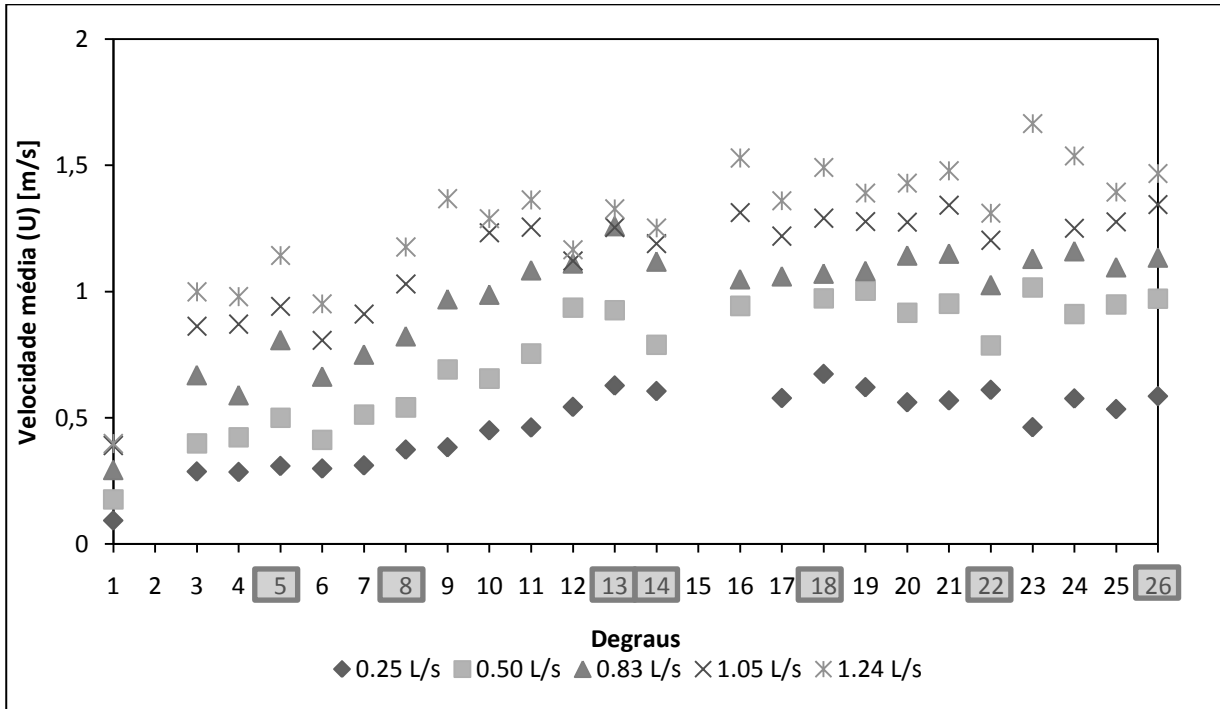
A velocidade média do escoamento ao longo do descarregador obteve-se através da relação entre o caudal médio escoado (Q_m), altura média de água registada experimentalmente (h_m) e largura de cada secção do canal em análise (B_i).

No Quadro 4.7 apresentam-se os valores das velocidades médias, U , ao longo do descarregador em estudo.

Quadro 4.7. Velocidades médias registadas experimentalmente no presente estudo.

Degraus	U (m/s)									
	Caudal [L/s]									
	0.25	0.50	0.83	1.05	1.24	1.50	1.69	1.92	2.19	2.29
1	0.093	0.177	0.293	0.390	0.398	0.424	0.442	0.484	0.516	0.505
2	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
3	0.287	0.398	0.669	0.862	0.999	1.093	1.098	1.094	1.205	1.186
4	0.285	0.423	0.589	0.871	0.980	1.121	1.151	1.123	1.240	1.260
5	0.309	0.500	0.808	0.941	1.143	1.196	1.351	1.572	1.649	2.025
6	0.299	0.412	0.663	0.807	0.952	1.167	1.241	1.401	1.359	1.383
7	0.311	0.512	0.750	0.910	*	1.126	1.284	1.199	1.280	1.314
8	0.374	0.541	0.822	1.030	1.176	1.352	1.527	1.515	1.563	1.732
9	0.383	0.692	0.969	*	1.368	1.300	1.434	1.360	1.470	1.496
10	0.450	0.655	0.987	1.233	1.289	1.379	1.421	1.463	1.469	1.488
11	0.462	0.754	1.084	1.255	1.363	1.389	1.409	1.462	1.502	1.489
12	0.543	0.936	1.111	1.122	1.165	1.289	1.228	1.343	1.452	1.391
13	0.628	0.926	1.259	1.254	1.327	1.510	1.573	1.572	1.711	1.657
14	0.606	0.789	1.118	1.189	1.252	1.472	1.582	1.563	1.730	1.682
15	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
16	*	0.943	1.048	1.313	1.529	1.426	1.476	1.510	1.668	1.790
17	0.578	*	1.060	1.220	1.360	1.418	1.532	1.519	1.674	1.707
18	0.674	0.973	1.071	1.291	1.491	1.503	1.537	1.579	1.712	1.709
19	0.621	1.003	1.081	1.277	1.390	1.522	1.610	1.625	1.810	1.736
20	0.562	0.916	1.142	1.275	1.430	1.422	1.514	1.555	*	1.652
21	0.569	0.952	1.150	1.342	1.478	1.480	1.559	1.566	1.582	*
22	0.611	0.786	1.025	1.203	1.310	1.349	1.369	1.392	1.500	1.521
23	0.463	1.016	1.129	*	1.665	1.599	1.494	1.639	1.815	1.710
24	0.577	0.910	1.159	1.250	1.537	1.512	1.553	1.622	1.757	1.662
25	0.535	0.948	1.096	1.276	1.394	1.462	1.526	1.559	1.669	1.682
26	0.586	0.972	1.134	1.345	1.468	1.641	1.587	1.688	1.781	1.767

Nas Figura 4.14 e Figura 4.15 encontra-se representada a relação entre U^* e U representativa das velocidades médias registadas nos estudos efectuados respectivamente no estudo efectuado por Ferreira (2009) e no presente estudo. Para facilidade de leitura, os caudais que na sua maioria apresentam características de escoamento de quedas sucessivas e escoamento de transição são representados na Figura 4.14 e na Figura 4.15 as velocidades referentes aos caudais que na sua maioria apresentam escoamento de transição e escoamento deslizante sobre turbilhões. É de notar que os pontos sujeitos a discontinuidades encontram-se identificados a sombreado cinzento.



Como se pode verificar, é notório um crescimento da velocidade média de escoamento mais acentuado na zona de convergência, após a qual a velocidade tende a estabilizar. Verificam-se oscilações mais acentuadas nos pontos de descontinuidade como mudança de material ou imperfeições no modelo, nos caudais que maioritariamente apresentam regimes de escoamento de transição e deslizante sobre turbilhões.

4.4.1 ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE O DESCARREGADOR EM ESTUDO E O DESCARREGADOR COM RUGOSIDADE ELEVADA, FERREIRA (2009)

No Quadro 4.8 apresentam-se os valores das velocidades médias de escoamento (U^*) encontradas por Ferreira (2009) no seu estudo num descarregador, de geometria similar ao do actual estudo, com rugosidade mais elevada.

Quadro 4.8 Velocidades médias registadas por Ferreira (2009), U^*

Degraus	U^* [m/s]									
	Caudal [L/s]									
	0.25	0.50	0.83	1.05	1.24	1.50	1.69	1.92	2.19	2.29
1	0.149	0.253	0.347	0.341	0.364	0.362	0.397	0.430	0.462	0.450
2	0.160	0.272	0.380	0.342	0.389	0.392	0.437	0.454	0.492	0.497
3	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
4	0.177	0.295	0.400	0.403	0.421	0.435	0.471	0.507	0.543	0.538
5	0.186	0.295	0.424	0.436	0.443	0.438	0.490	0.526	0.570	0.559
6	0.199	0.280	0.420	0.412	0.464	0.465	0.504	0.550	0.584	0.585
7	0.206	0.293	0.408	0.423	0.469	0.438	0.501	0.579	0.614	0.587
8	0.220	0.309	0.427	0.443	0.481	0.505	0.526	0.608	0.633	0.596
9	0.227	0.321	0.407	0.466	0.498	0.529	0.584	0.641	0.663	0.629
10	0.241	0.364	0.413	0.499	0.546	0.571	0.627	0.680	0.657	0.652
11	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
12	0.286	0.445	0.439	0.560	0.674	0.695	0.760	0.818	0.774	0.773
13	0.303	0.575	0.524	0.673	0.814	0.810	0.943	0.975	0.938	0.902
14	0.274	0.360	0.454	0.465	0.561	0.703	0.830	0.793	0.824	0.830
15	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
16	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
17	0.279	0.604	0.467	0.490	0.571	0.739	0.810	0.769	0.822	0.802
18	0.287	0.561	0.480	0.507	0.609	0.756	0.841	0.779	0.836	0.795
19	0.273	0.552	0.476	0.503	0.602	0.748	0.849	0.767	0.836	0.796
20	0.283	0.521	0.470	0.495	0.597	*	0.854	0.772	0.812	0.801
21	0.286	0.525	0.456	0.502	0.607	0.748	0.848	0.766	0.853	0.806
22	0.267	0.512	0.477	0.506	0.611	0.739	0.863	0.770	0.853	0.797
23	0.245	0.455	0.451	0.490	0.539	0.677	0.766	0.720	0.768	0.735
24	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
25	0.326	0.557	0.644	0.667	0.767	0.701	0.784	0.914	0.955	0.763
26	0.362	0.565	0.670	0.677	0.828	0.734	0.821	0.989	0.988	0.774

A comparação dos valores de velocidade, traduzida pela razão (b) entre a velocidade registada experimentalmente no descarregador de elevada rugosidade (U^*) e a registada no presente estudo (U), é apresentada no Quadro 4.9.

Quadro 4.9. Relação, b , entre as velocidades médias registadas experimentalmente por Ferreira (2009) e as encontradas no presente estudo.

Degraus	$b = U^*/U$									
	Caudal [L/s]									
	0,25	0,50	0,82	1,05	1,24	1,50	1,69	1,92	2,19	2,29
1	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
2	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
3	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
4	0.62	0.70	0.68	0.46	0.43	0.39	0.41	0.45	0.44	0.43
5	0.60	0.59	0.53	0.46	0.39	0.37	0.36	0.33	0.35	0.28
6	0.67	0.68	0.63	0.51	0.49	0.40	0.41	0.39	0.43	0.42
7	0.66	0.57	0.54	0.46	*	0.39	0.39	0.48	0.48	0.45
8	0.59	0.57	0.52	0.43	0.41	0.37	0.34	0.40	0.41	0.34
9	0.59	0.46	0.42	*	0.36	0.41	0.41	0.47	0.45	0.42
10	0.54	0.56	0.42	0.40	0.42	0.41	0.44	0.46	0.45	0.44
11	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
12	0.53	0.48	0.40	0.50	0.58	0.54	0.62	0.61	0.53	0.56
13	0.48	0.62	0.42	0.54	0.61	0.54	0.60	0.62	0.55	0.54
14	0.45	0.46	0.41	0.39	0.45	0.48	0.52	0.51	0.48	0.49
15	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
16	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
17	0.48		0.44	0.40	0.42	0.52	0.53	0.51	0.49	0.47
18	0.43	0.58	0.45	0.39	0.41	0.50	0.55	0.49	0.49	0.47
19	0.44	0.55	0.44	0.39	0.43	0.49	0.53	0.47	0.46	0.46
20	0.50	0.57	0.41	0.39	0.42	*	0.56	0.50	*	0.48
21	0.50	0.55	0.40	0.37	0.41	0.51	0.54	0.49	0.54	*
22	0.44	0.65	0.47	0.42	0.47	0.55	0.63	0.55	0.57	0.52
23	0.53	0.45	0.40	*	0.32	0.42	0.51	0.44	0.42	0.43
24	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
25	0.61	0.59	0.59	0.52	0.55	0.48	0.51	0.59	0.57	0.45
26	0.62	0.58	0.59	0.50	0.56	0.45	0.52	0.59	0.55	0.44

Nas Figura 4.16 e Figura 4.17 encontram-se representada a relação U^* e U representativas das velocidades médias registadas nos estudos efectuados, respectivamente no estudo efectuado por Ferreira (2009) e no presente estudo.

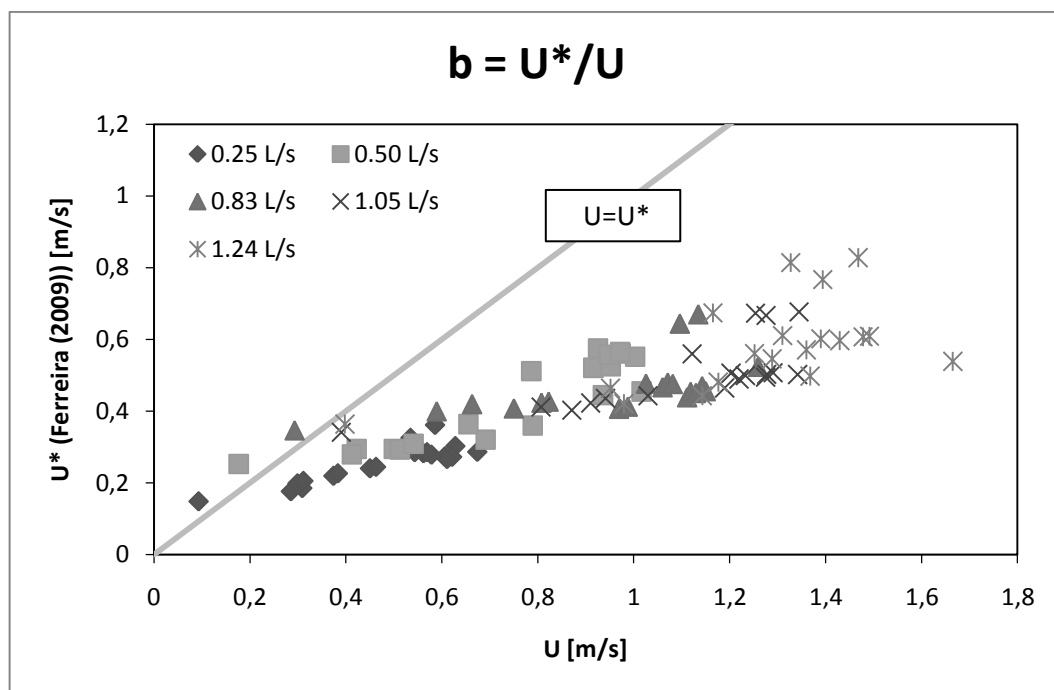


Figura 4.16. Relação, b , entre as velocidades médias registadas experimentalmente por Ferreira (2009) e as encontradas no presente estudo.

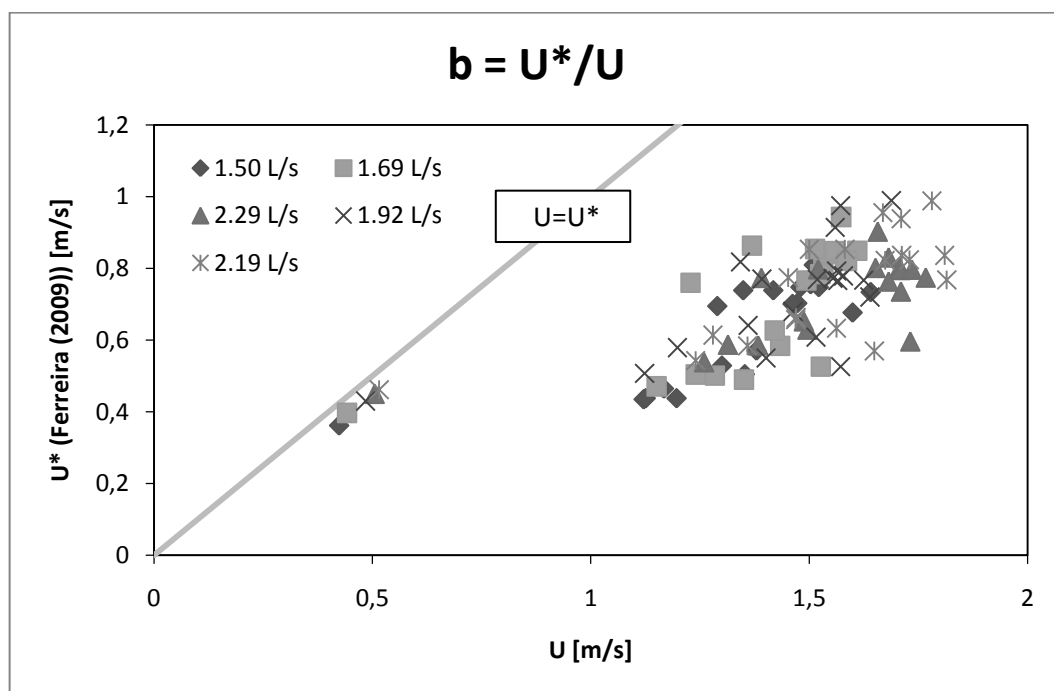


Figura 4.17. Relação, b , entre as velocidades médias registadas experimentalmente por Ferreira (2009) e as encontradas no presente estudo.

Da análise comparativa entre os valores das velocidades médias de escoamento, é possível constatar que as obtidas no presente estudo são superiores às verificadas no estudo anteriormente efectuado por Ferreira (2009), sendo que a relação entre elas é tanto menor quanto maior for o caudal, contudo verificam-se semelhanças quanto às linhas de crescimento.

Da relação encontrada entre as velocidades médias de escoamento registadas nos dois estudos nomeadamente entre as do descarregador com maior rugosidade e do presente, verificam-se relações b entre os dois estudos variam entre 0.70 e 0.38.

4.5 DISSIPACÃO DE ENERGIA

O cálculo da dissipação de energia, como foi referenciado no capítulo 2, é um dos aspectos fundamentais a avaliar no estudo dos descarregadores não convencionais em degraus, uma vez que a função principal deste dispositivo de dissipação de cheia é permitir a dissipação de energia ao longo do canal descarregador, fazendo com que a restituição seja a mais próxima possível do regime natural do escoamento a jusante do aproveitamento. No presente ponto será avaliada a dissipação de energia registada no trabalho laboratorial a qual será comparada com os correspondentes valores registados no descarregador de rugosidade elevada encontrado por Ferreira (2009) e será feita a comparação com os valores propostos pelos diversos autores referenciados.

4.5.1 VALORES DA ENERGIA ESPECÍFICA EM CADA DEGRAU DO DESCARREGADOR

A energia específica (E_p) em cada degrau é dada pela expressão (4.2) onde h representa a altura do escoamento, medida segundo a normal ao leito desde o fundo até à superfície livre, U a velocidade média do escoamento, α_e coeficiente de Coriolis e α é o ângulo formado entre o fundo e o plano de referência considerado. Para os cálculos efectuados será adoptado α_e igual à unidade.

$$E_p = h * \cos\alpha + \alpha_e \frac{U^2}{2*g} \quad (4.2)$$

Procedeu-se ao cálculo para duas situações distintas, as quais adoptam diferentes considerações para a linha de fundo consoante o regime de escoamento presente, isto é, quando o regime de escoamento é do tipo quedas sucessivas a linha de fundo é a superfície do degrau, no caso do regime de escoamento ser do tipo deslizante sobre turbilhões a linha de fundo considerada é a linha de pseudo-fundo. Estas considerações têm implicações directas na altura de água, h , a qual deverá ser considerada na normal a linha de fundo.

Nas Figura 4.18 e Figura 4.19 é possível visualizar de forma esquemática as duas considerações adoptadas, sendo evidente a forma como a altura de água, h , é considerada no calculo da energia específica.

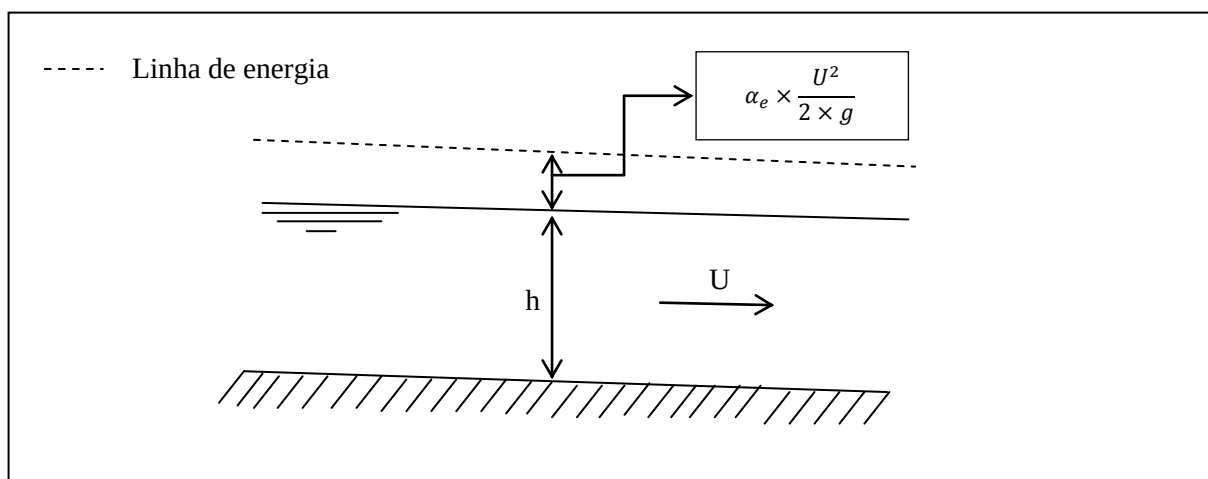


Figura 4.18. Esquema representativo das variáveis intervenientes no cálculo da energia específica para EQS.
Fonte: Quintela (2001) (adaptado)

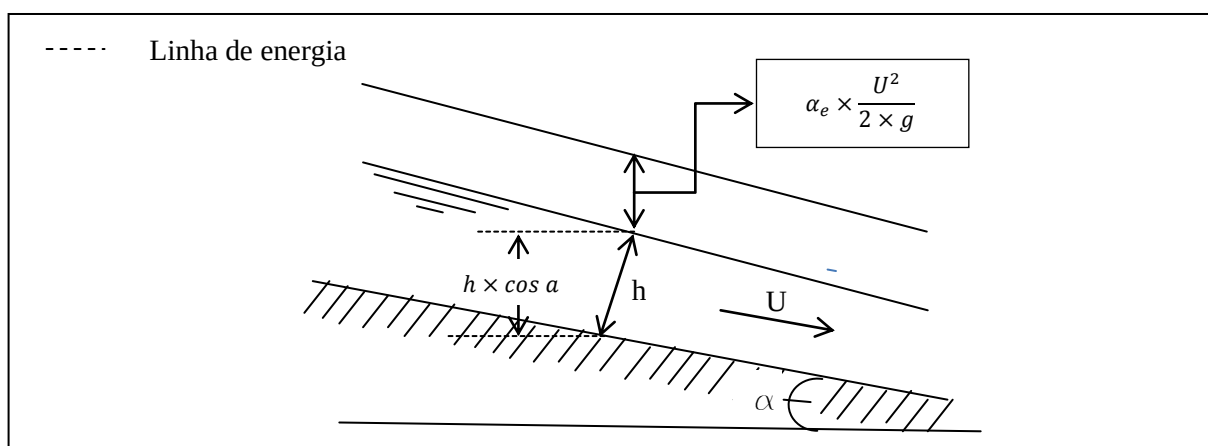


Figura 4.19 Esquema representativo das variáveis intervenientes no cálculo da energia específica para EDT.
Fonte: Quintela (2001) (adaptado)

Das Figura 4.18 e Figura 4.19 é evidente que quando o tem características de escoamento em quedas sucessivas e a superfície livre da água encontra-se paralela ao degrau o valor do $\cos \alpha \cong 1$ e a altura de água a considerar é a altura de água média registada experimentalmente, h_m , perpendicular à superfície do degrau. Quando o escoamento apresenta características de escoamento deslizando sobre turbilhões e a superfície de referência a de pseudo-fundo, a inclinação do canal passa a ter relevância, assim como a forma como a altura média de água registada experimentalmente (h_m) é tratada, sendo necessárias as correcções apresentadas na Figura 4.19

Contudo considerando a existência de um regime de escoamento transitório é necessário ter em conta a forma como o escoamento se processa, uma vez que o regime transitório dependendo do caudal escoado e da secção em estudo apresenta configurações distintas, aproximando-se quer da apresentada para o Escoamento em quedas sucessivas quer a correspondente ao escoamento deslizando sobre turbilhões. Consequentemente este aspecto tem influência na forma como a altura de água é medida, o que leva às correspondentes formas de cálculo da energia. Como tal, para o cálculo da energia específica, quando o regime é transitório, serão adoptadas as duas possibilidades de cálculo.

Nos Quadros 4.10 e Quadro 4.11 são apresentadas as energias específicas calculadas considerando respectivamente o regime de escoamento transitório como apresentando características de escoamento em quedas sucessivas e escoamento transitório como apresentando características de escoamento deslizante sobre turbilhões (nos quadros a notação utilizada para os diferentes valores é EQS – Azul, TRA – Preto e EDT – vermelho).

Quadro 4.10. Energia específica para cada caudal ensaiado, considerando TRA com características semelhantes a EQS.

Degraus	Energia Específica – Ep [m]									
	Caudal [L/s]									
	0.25	0.50	0.83	1.05	1.24	1.50	1.69	1.92	2.19	2.29
1	0.015	0.022	0.024	0.027	0.030	0.034	0.037	0.040	0.044	0.045
2	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
3	0.011	0.018	0.033	0.048	0.061	0.072	0.074	0.075	0.088	0.087
4	0.012	0.019	0.030	0.049	0.060	0.075	0.080	0.079	0.093	0.096
5	0.012	0.022	0.042	0.055	0.076	0.084	0.104	0.137	0.151	0.219
6	0.013	0.020	0.034	0.046	0.059	0.082	0.092	0.113	0.110	0.114
7	0.013	0.024	0.040	0.054	*	0.078	0.098	0.090	0.099	0.104
8	0.015	0.025	0.046	0.066	0.082	0.106	0.131	0.130	0.138	0.166
9	0.016	0.033	0.058	*	0.107	0.100	0.119	0.110	0.126	0.131
10	0.018	0.032	0.061	0.089	0.098	0.112	0.117	0.125	0.128	0.131
11	0.019	0.039	0.072	0.093	0.109	0.115	0.117	0.126	0.134	0.133
12	0.023	0.054	0.076	0.080	0.088	0.102	0.098	0.113	0.130	0.123
13	0.028	0.054	0.094	0.097	0.108	0.133	0.145	0.147	0.171	0.164
14	0.027	0.044	0.079	0.090	0.100	0.128	0.146	0.146	0.175	0.168
15	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
16	*	0.056	0.072	0.104	0.135	0.122	0.131	0.138	0.165	0.186
17	0.026	*	0.073	0.093	0.112	0.121	0.139	0.140	0.166	0.172
18	0.031	0.059	0.074	0.101	0.130	0.133	0.140	0.148	0.172	0.172
19	0.028	0.061	0.075	0.100	0.116	0.135	0.150	0.155	0.188	0.177
20	0.025	0.054	0.081	0.099	0.122	0.121	0.136	0.145	*	0.163
21	0.025	0.057	0.082	0.107	0.128	0.129	0.143	0.146	0.152	
22	0.027	0.044	0.070	0.091	0.106	0.112	0.117	0.123	0.140	0.144
23	0.022	0.062	0.080	*	0.156	0.147	0.133	0.157	0.189	0.172
24	0.026	0.053	0.083	0.096	0.137	0.134	0.142	0.155	0.179	0.165
25	0.024	0.056	0.076	0.099	0.117	0.127	0.138	0.145	0.165	0.168
26	0.026	0.058	0.080	0.108	0.127	0.153	0.147	0.165	0.183	0.182

Quadro 4.11. Energia específica para cada caudal ensaiado, considerando TRA com características semelhantes a EDT.

Degraus	Energia Específica – Ep [m]									
	Caudal [L/s]									
	0.25	0.50	0.83	1.05	1.24	1.50	1.69	1.92	2.19	2.29
1	0.015	0.022	0.024	0.027	0.030	0.034	0.037	0.040	0.044	0.045
2	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
3	0.011	0.018	0.033	0.048	0.061	0.072	0.074	0.075	0.086	0.085
4	0.012	0.019	0.030	0.049	0.060	0.075	0.078	0.077	0.091	0.094
5	0.012	0.022	0.042	0.055	0.076	0.083	0.103	0.136	0.149	0.218
6	0.013	0.020	0.034	0.046	0.057	0.080	0.090	0.112	0.108	0.111
7	0.013	0.024	0.040	0.053	*	0.077	0.096	0.088	0.099	0.104
8	0.015	0.025	0.046	0.064	0.081	0.104	0.130	0.130	0.138	0.166
9	0.016	0.033	0.058	*	0.105	0.099	0.117	0.110	0.126	0.131
10	0.018	0.032	0.061	0.088	0.096	0.110	0.117	0.125	0.128	0.131
11	0.019	0.039	0.072	0.091	0.107	0.113	0.117	0.126	0.134	0.133
12	0.023	0.054	0.076	0.078	0.085	0.102	0.098	0.113	0.130	0.123
13	0.028	0.054	0.092	0.095	0.106	0.133	0.145	0.147	0.171	0.164
14	0.027	0.044	0.077	0.087	0.097	0.128	0.146	0.146	0.175	0.168
15	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
16	*	0.056	0.070	0.102	0.133	0.122	0.131	0.138	0.165	0.186
17	0.026	*	0.071	0.091	0.110	0.121	0.139	0.140	0.166	0.172
18	0.031	0.059	0.072	0.099	0.128	0.133	0.140	0.148	0.172	0.172
19	0.028	0.061	0.073	0.097	0.114	0.135	0.150	0.155	0.188	0.177
20	0.025	0.054	0.079	0.097	0.119	0.121	0.136	0.145	*	0.163
21	0.025	0.057	0.080	0.105	0.126	0.129	0.143	0.146	0.152	*
22	0.027	0.044	0.068	0.089	0.104	0.112	0.117	0.123	0.140	0.144
23	0.022	0.062	0.078	*	0.154	0.147	0.133	0.157	0.189	0.172
24	0.026	0.053	0.081	0.094	0.135	0.134	0.142	0.155	0.179	0.165
25	0.024	0.056	0.074	0.097	0.115	0.127	0.138	0.145	0.165	0.168
26	0.026	0.058	0.078	0.106	0.125	0.153	0.147	0.165	0.183	0.182

Com esta análise verifica-se que com a consideração de TRA como EQS a energia específica é superior em cerca de 2% da verificada para a consideração de TRA/EDT. Na realidade a diferença apresentada não é muito significativa. Como tal, nas análises efectuadas serão utilizados os valores de energia específica referentes a consideração de TRA/EQS, visto esta ser a situação mais gravosa.

Na Figura 4.20 e Figura 4.21 é possível visualizar a energia específica em cada degrau. A sombreado cinzento encontram-se referenciados os pontos sujeitos a descontinuidades, nomeadamente passagem betão para perspex e erros de construção do modelo. A energia específica encontra-se identificada pela notação Ep.

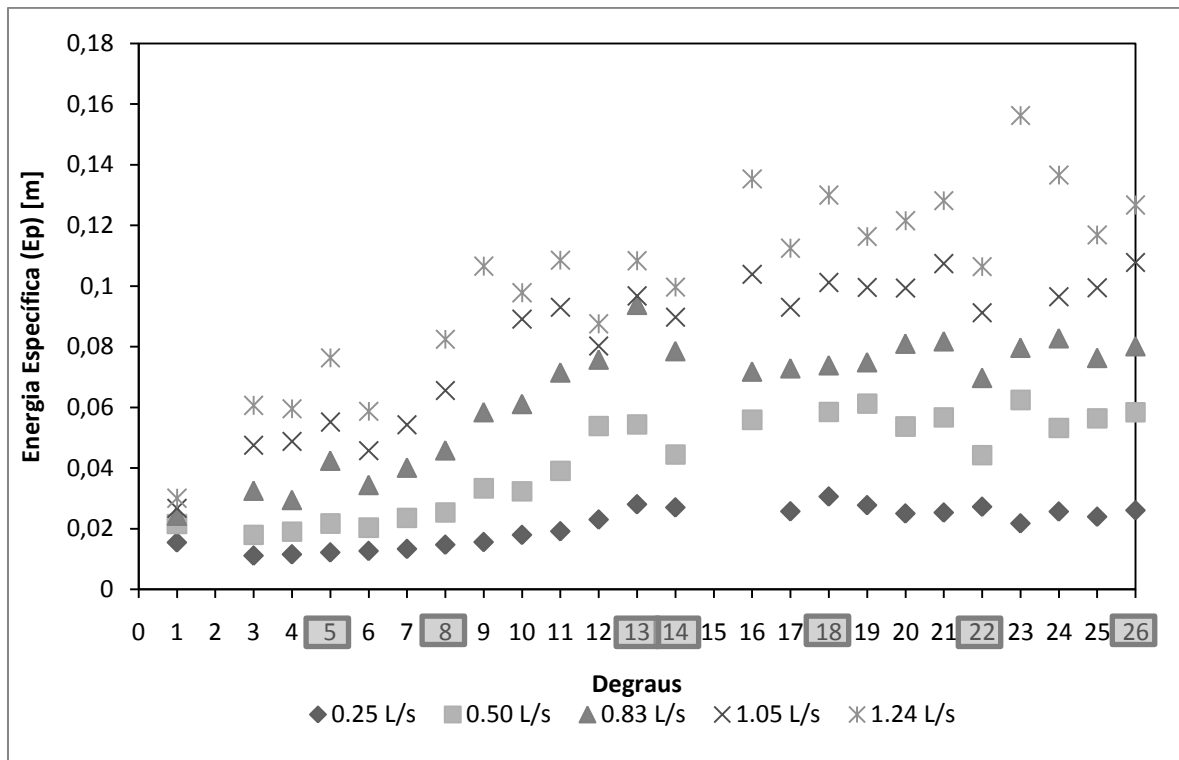


Figura 4.20. Energia específica registada em cada degrau, para gamas de caudais que apresentem maioritariamente regimes de escoamento EQS/TRA.

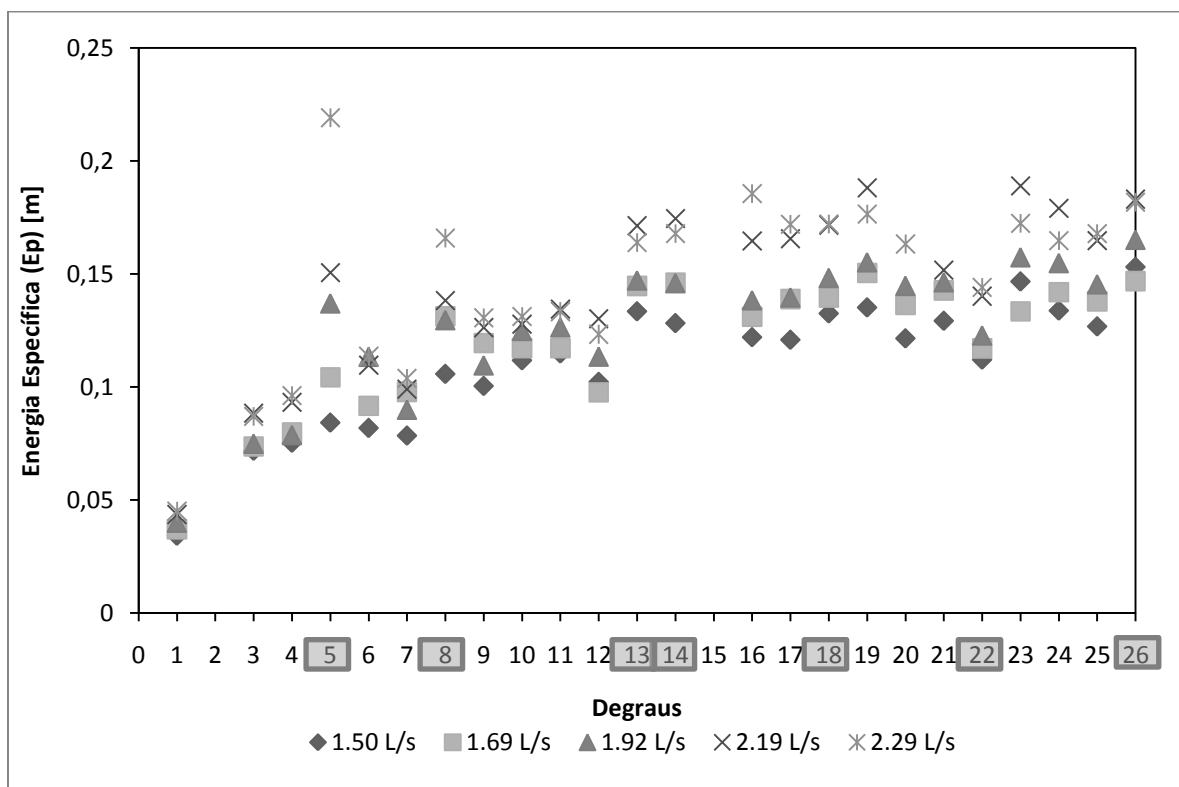


Figura 4.21. Energia específica registada em cada degrau, para caudais que apresentem maioritariamente regimes de escoamento TRA/EDT.

4.5.2 ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE O DESCARREGADOR EM ESTUDO E O DESCARREGADOR COM RUGOSIDADE ELEVADA, FERREIRA (2009)

No Quadro 4.12 apresentam-se os valores da energia específica, Ep^* , encontradas por Ferreira (2009) no seu estudo num descarregador, de geometria similar ao do actual estudo, com rugosidade mais elevada.

Quadro 4.12. Energia específica, Ep^* , registada experimentalmente por Ferreira (2009).

Degraus	Energia Específica – Ep^* [m]									
	Caudal [L/s]									
	0.25	0.50	0.83	1.05	1.24	1.50	1.69	1.92	2.19	2.29
1	0.012	0.017	0.023	0.028	0.031	0.035	0.038	0.041	0.044	0.046
2	0.012	0.017	0.023	0.029	0.031	0.036	0.038	0.042	0.045	0.047
3	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
4	0.013	0.018	0.025	0.030	0.033	0.038	0.041	0.045	0.048	0.050
5	0.014	0.019	0.026	0.031	0.035	0.040	0.043	0.046	0.050	0.048
6	0.014	0.020	0.027	0.033	0.036	0.041	0.045	0.048	0.048	0.050
7	0.014	0.021	0.029	0.034	0.038	0.041	0.047	0.051	0.050	0.052
8	0.015	0.022	0.030	0.036	0.040	0.045	0.049	0.049	0.053	0.055
9	0.016	0.023	0.032	0.038	0.042	0.048	0.047	0.052	0.056	0.058
10	0.016	0.024	0.034	0.040	0.045	0.051	0.051	0.056	0.059	0.061
11	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
12	0.018	0.028	0.040	0.045	0.053	0.055	0.061	0.067	0.070	0.072
13	0.019	0.033	0.042	0.051	0.058	0.063	0.074	0.080	0.082	0.082
14	0.020	0.023	0.043	0.051	0.051	0.059	0.067	0.070	0.076	0.079
15	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
16	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
17	0.020	0.034	0.043	0.051	0.050	0.060	0.067	0.070	0.076	0.078
18	0.021	0.033	0.044	0.052	0.052	0.062	0.069	0.071	0.078	0.080
19	0.020	0.032	0.044	0.052	0.052	0.061	0.069	0.071	0.078	0.080
20	0.021	0.032	0.044	0.051	0.052	*	0.070	0.071	0.078	0.080
21	0.021	0.032	0.045	0.051	0.052	0.061	0.069	0.071	0.079	0.080
22	0.021	0.031	0.044	0.051	0.052	0.061	0.070	0.071	0.079	0.080
23	0.019	0.028	0.041	0.048	0.048	0.057	0.062	0.065	0.071	0.073
24	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
25	0.018	0.031	0.042	0.049	0.052	0.056	0.063	0.073	0.080	0.074
26	0.018	0.031	0.043	0.049	0.056	0.057	0.064	0.078	0.082	0.074

A comparação entre os valores da energia específica encontrados nos dois estudos efectuados dentro desta temática (Ferreira (2009) e o actual estudo) traduz-se pela relação entre os valores de energia específica registados experimentalmente no ensaio com descarregador de rugosidade elevada (Ep^*) e os registados no presente estudo (Ep), através do cálculo da razão $c = Ep^*/Ep$. No Quadro 4.13 são apresentados os valores encontrados da relação c .

Quadro 4.13. Relação, c , entre a energia específica registada experimentalmente por Ferreira (2009) e as encontradas no presente estudo.

Degraus	$c = E_p^*/E_p$									
	Caudal [L/s]									
	0.25	0.50	0.82	1.05	1.24	1.50	1.69	1.92	2.19	2.29
1	0.81	0.79	0.93	1.03	1.02	1.04	1.03	1.02	1.01	1.03
2	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
3	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
4	1.15	0.96	0.85	0.62	0.56	0.51	0.51	0.57	0.52	0.52
5	1.13	0.89	0.62	0.57	0.45	0.47	0.41	0.34	0.33	0.22
6	1.09	1.01	0.79	0.71	0.62	0.50	0.49	0.43	0.44	0.44
7	1.09	0.90	0.72	0.63	*	0.52	0.48	0.56	0.51	0.50
8	1.01	0.87	0.66	0.55	0.49	0.43	0.37	0.38	0.39	0.33
9	1.01	0.70	0.55	*	0.39	0.47	0.40	0.47	0.45	0.45
10	0.92	0.75	0.56	0.45	0.46	0.45	0.43	0.45	0.46	0.47
11	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
12	0.79	0.52	0.53	0.56	0.60	0.53	0.62	0.59	0.54	0.59
13	0.68	0.60	0.45	0.53	0.53	0.47	0.51	0.54	0.48	0.50
14	0.76	0.52	0.55	0.56	0.51	0.46	0.46	0.48	0.44	0.47
15	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
16	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
17	0.79	*	0.59	0.55	0.45	0.49	0.48	0.50	0.46	0.46
18	0.68	0.56	0.59	0.51	0.40	0.46	0.49	0.48	0.46	0.46
19	0.74	0.53	0.59	0.53	0.45	0.45	0.46	0.46	0.42	0.45
20	0.83	0.59	0.54	0.52	0.43	*	0.51	0.49	*	0.49
21	0.82	0.56	0.54	0.48	0.41	0.47	0.49	0.49	0.52	*
22	0.76	0.71	0.63	0.56	0.49	0.54	0.60	0.58	0.56	0.56
23	0.89	0.46	0.51		0.30	0.39	0.46	0.41	0.38	0.42
24	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
25	0.76	0.55	0.55	0.49	0.45	0.44	0.45	0.50	0.48	0.44
26	0.70	0.53	0.54	0.46	0.44	0.37	0.44	0.47	0.45	0.41

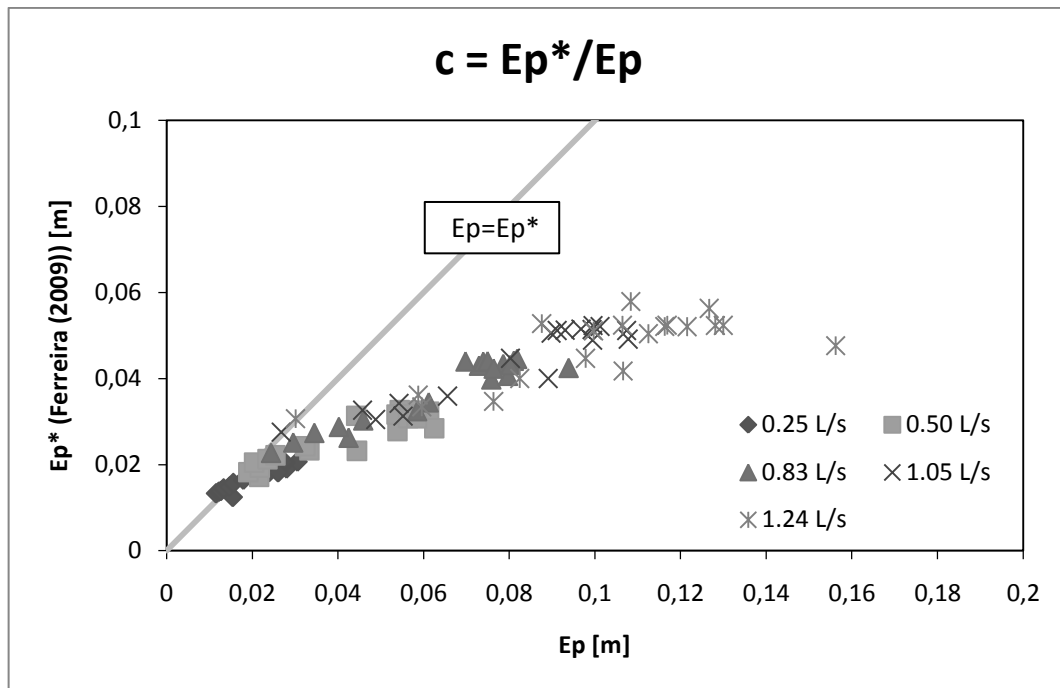


Figura 4.22 Relação, c , entre a energia específica registada experimentalmente por Ferreira (2009) e as encontradas no presente estudo.

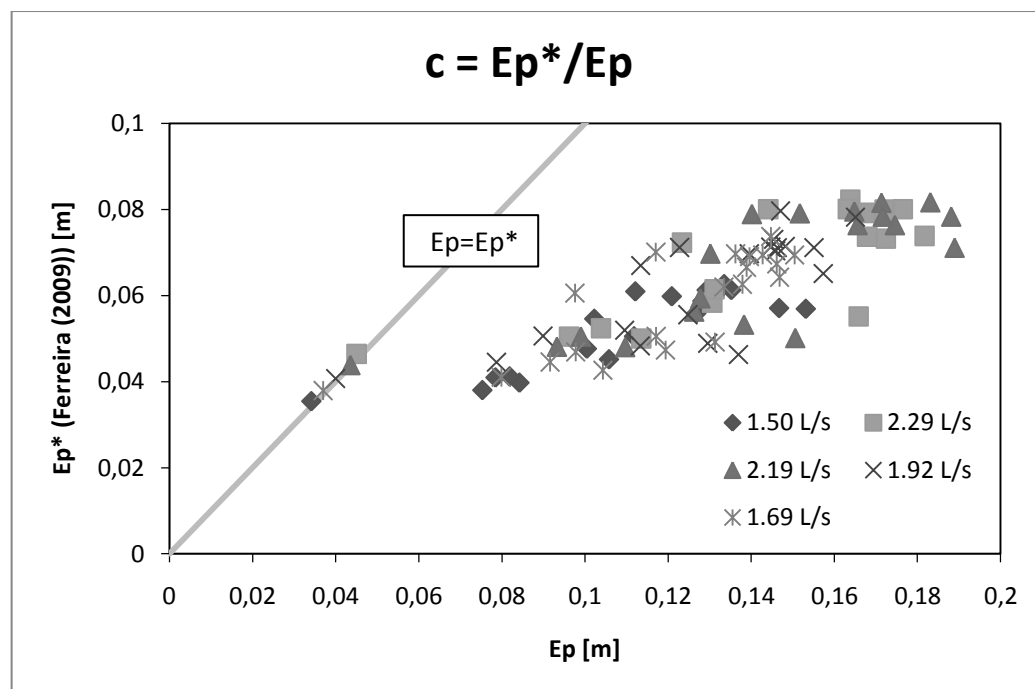


Figura 4.23. Relação, c , entre a energia específica registada experimentalmente por Ferreira (2009) e as encontradas no presente estudo.

Da análise comparativa entre os valores das energias específicas verificadas, conclui-se que as energias específicas verificadas no estudo anteriormente efectuado por Ferreira (2009) são inferiores às registadas no presente estudo, com excepção dos dois caudais mais baixos que apresentam para os primeiros degraus valores superiores.

Da relação encontrada entre as energias específicas de escoamento registadas nos dois estudos nomeadamente entre as do descarregador com maior rugosidade e do presente, verificam-se que as relações c entre os dois estudos variam entre 0.30 e 1.15 sendo a razão mais baixa verificada para a gama de caudais superior.

4.5.3 ENERGIA TOTAL AO LONGO DO DESCARREGADOR

A energia total foi calculada, com base na energia específica (E_p), anteriormente calculada, adicionando-lhe a cota real do ponto relativamente ao plano de referência (equação 4.2).

$$E_i = z_i + Ep_i \quad (4.2)$$

Sendo E_i a energia correspondente a cada degrau, z_i a cota desde o plano de referência até à soleira do degrau i e Ep_i a energia específica associada ao degrau em análise.

O plano de referência adoptado corresponde à cota da bacia de dissipação. Na Figura 4.24 encontra-se representado esquematicamente o perfil do descarregador assim como representação da cota a considerar (variável z_i).

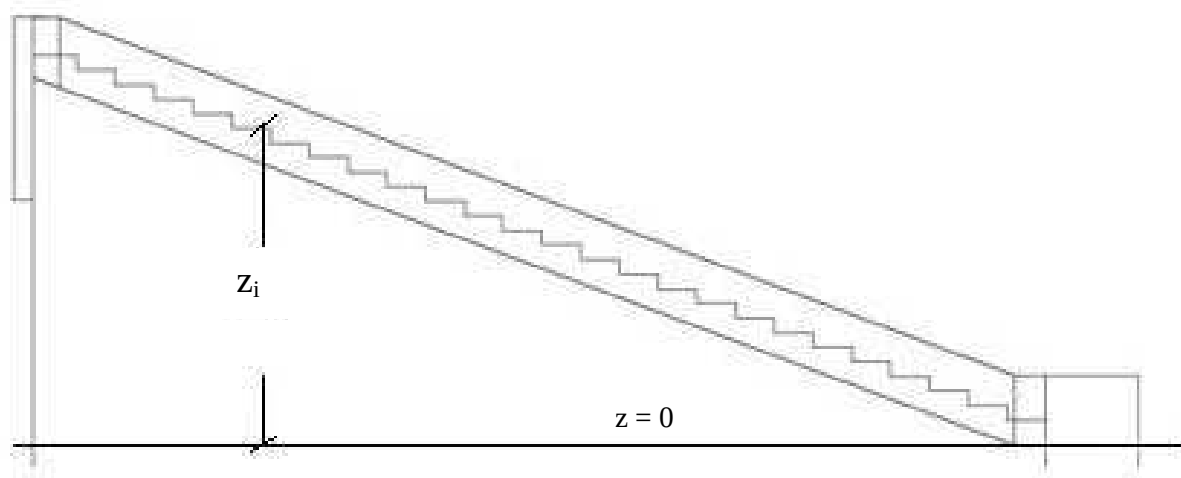


Figura 4.24. Esquema do descarregador e indicação do plano de referencia considerado.

Os valores de energia total, E , registada ao longo do descarregador em análise, encontram-se no Quadro 4.14.

Quadro 4.14. Energia Total Registada experimentalmente ao longo do descarregador, E [m].

Degraus	E [m]									
	Caudal [L/s]									
	0.25	0.50	0.83	1.05	1.24	1.50	1.69	1.92	2.19	2.29
1	1.02	1.02	1.02	1.03	1.03	1.03	1.04	1.04	1.04	1.05
2	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
3	0.93	0.94	0.95	0.97	0.98	0.99	0.99	0.99	1.01	1.01
4	0.89	0.90	0.91	0.93	0.94	0.96	0.96	0.96	0.97	0.98
5	0.85	0.86	0.89	0.90	0.92	0.93	0.95	0.98	0.99	1.06
6	0.82	0.82	0.84	0.85	0.86	0.89	0.90	0.92	0.91	0.92
7	0.78	0.79	0.81	0.82	*	0.84	0.86	0.86	0.87	0.87
8	0.74	0.75	0.77	0.79	0.81	0.83	0.86	0.86	0.87	0.89
9	0.71	0.72	0.75	*	0.80	0.79	0.81	0.80	0.82	0.82
10	0.67	0.68	0.71	0.74	0.75	0.76	0.77	0.78	0.78	0.78
11	0.63	0.65	0.68	0.71	0.72	0.73	0.73	0.74	0.75	0.75
12	0.60	0.63	0.65	0.65	0.66	0.68	0.67	0.69	0.70	0.70
13	0.56	0.59	0.63	0.63	0.64	0.67	0.68	0.68	0.71	0.70
14	0.52	0.54	0.58	0.59	0.60	0.63	0.64	0.64	0.67	0.67
15	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
16	*	0.48	0.49	0.53	0.56	0.54	0.55	0.56	0.59	0.61
17	0.41	*	0.46	0.48	0.50	0.50	0.52	0.52	0.55	0.56
18	0.38	0.40	0.42	0.45	0.47	0.48	0.48	0.49	0.52	0.52
19	0.33	0.37	0.38	0.41	0.42	0.44	0.46	0.46	0.49	0.48
20	0.29	0.32	0.35	0.37	0.39	0.39	0.40	0.41	*	0.43
21	0.26	0.29	0.31	0.34	0.36	0.36	0.37	0.38	0.38	*
22	0.22	0.24	0.26	0.28	0.30	0.30	0.31	0.31	0.33	0.34
23	0.17	0.22	0.23	*	0.31	0.30	0.29	0.31	0.34	0.33
24	0.14	0.17	0.20	0.21	0.25	0.25	0.26	0.27	0.29	0.28
25	0.10	0.13	0.15	0.18	0.19	0.20	0.21	0.22	0.24	0.24
26	0.06	0.10	0.12	0.15	0.17	0.19	0.19	0.20	0.22	0.22

Partindo do conhecimento da energia em cada um dos degraus é possível representar graficamente a linha de energia associada a cada caudal médio. Na Figura 4.25 representa-se o perfil do descarregador e as correspondentes energias calculadas para cada degrau.

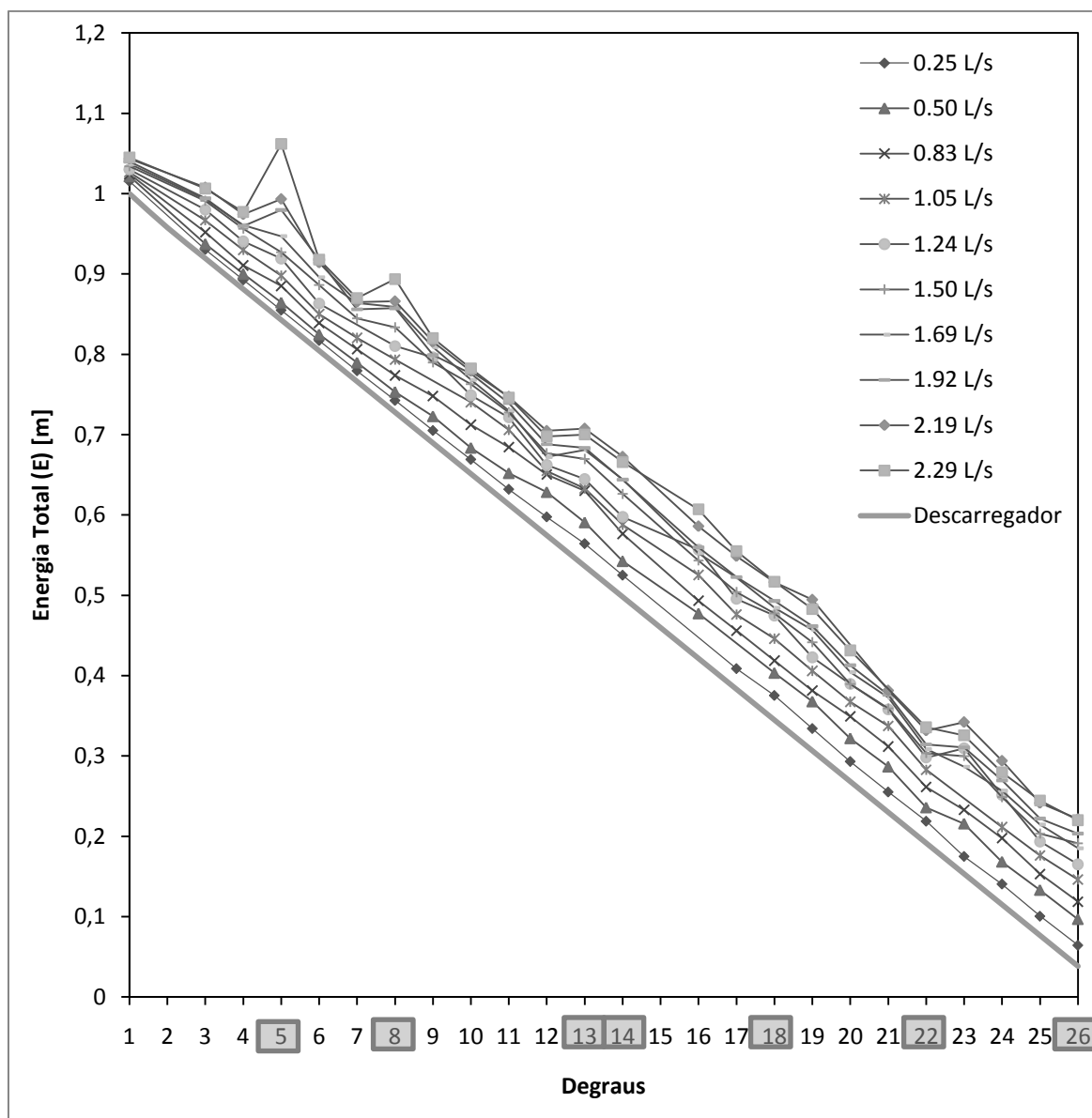


Figura 4.25. Perfil do descarregador e linhas de energia correspondentes a cada caudal médio ensaiado.

Ao analisar o gráfico da Figura 4.25, verifica-se que a energia decresce para jusante, sendo que o decréscimo é menos acentuado na zona convergente do descarregador e mais acentuado na zona de largura constante, devido a um aumento gradual da velocidade ampliado por essa mesma convergência.

A linha de energia apresenta alguns pontos que se encontram desfasados dos restantes, correspondem a picos acentuados de energia ou decréscimos bruscos. Esses pontos, contudo não apresentam qualquer relevância para o presente estudo, uma vez que correspondem a zonas de descontinuidade de rugosidade pela aplicação do perspex ou a imperfeições existentes ao longo do canal.

4.5.4 ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE O DESCARREGADOR EM ESTUDO E O DESCARREGADOR COM RUGOSIDADE ELEVADA, FERREIRA (2009)

No Quadro 4.15 apresenta-se os valores da energia total (E^*) registada por Ferreira (2009) no estudo num descarregador de geometria semelhante ao do actual estudo, mas com rugosidade mais elevada.

Quadro 4.15. Energia total verificada experimentalmente por Ferreira (2009), E^* [m].

Degraus	E^* [m]									
	Caudal [L/s]									
	0.25	0.50	0.83	1.05	1.24	1.50	1.69	1.92	2.19	2.29
1	1.01	1.02	1.02	1.03	1.03	1.04	1.04	1.04	1.04	1.05
2	0.97	0.97	0.98	0.99	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00
3	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
4	0.89	0.90	0.91	0.91	0.91	0.92	0.92	0.93	0.93	0.93
5	0.86	0.86	0.87	0.87	0.88	0.88	0.89	0.89	0.89	0.89
6	0.82	0.82	0.83	0.84	0.84	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85
7	0.78	0.79	0.79	0.80	0.80	0.81	0.81	0.82	0.82	0.82
8	0.74	0.75	0.76	0.76	0.77	0.77	0.78	0.78	0.78	0.78
9	0.71	0.71	0.72	0.73	0.73	0.74	0.74	0.74	0.75	0.75
10	0.67	0.68	0.69	0.69	0.70	0.70	0.70	0.71	0.71	0.71
11	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
12	0.59	0.60	0.61	0.62	0.63	0.63	0.64	0.64	0.64	0.65
13	0.56	0.57	0.58	0.59	0.59	0.60	0.61	0.62	0.62	0.62
14	0.52	0.52	0.54	0.55	0.55	0.56	0.57	0.57	0.57	0.58
15	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
16	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
17	0.40	0.42	0.43	0.43	0.43	0.44	0.45	0.45	0.46	0.46
18	0.37	0.38	0.39	0.40	0.40	0.41	0.41	0.42	0.42	0.42
19	0.33	0.34	0.35	0.36	0.36	0.37	0.38	0.38	0.38	0.39
20	0.29	0.30	0.31	0.32	0.32	*	0.34	0.34	0.35	0.35
21	0.25	0.26	0.27	0.28	0.28	0.29	0.30	0.30	0.31	0.31
22	0.21	0.22	0.24	0.24	0.24	0.25	0.26	0.26	0.27	0.27
23	0.17	0.18	0.19	0.20	0.20	0.21	0.22	0.22	0.22	0.23
24	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
25	0.09	0.11	0.12	0.13	0.13	0.13	0.14	0.15	0.16	0.15
26	0.06	0.07	0.08	0.09	0.09	0.10	0.10	0.12	0.12	0.11

Nas Figura 4.26 e Figura 4.27 é apresentado, o esquema das linhas de energias associadas a cada caudal ensaiado, apresentado por Ferreira (2009) para descarregador de geometria semelhante ao presentemente ensaiado com rugosidade superior.

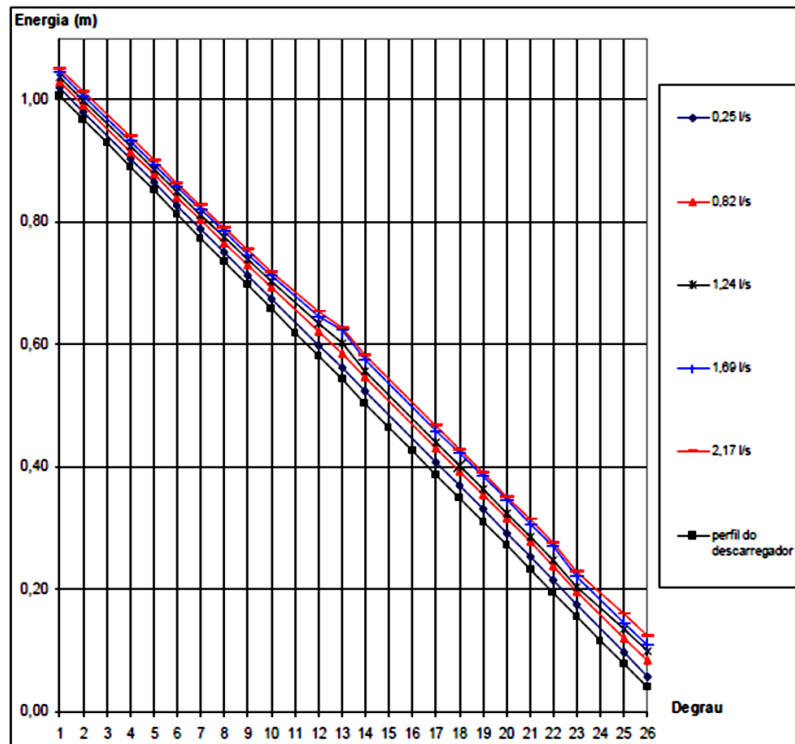


Figura 4.26. Perfil do descarregador e linhas de energia, obtidos por Ferreira (2009), para os caudais 0.25 L/s, 0.82 L/s, 1.24 L/s, 1.69 L/s e 2.17 L/s.

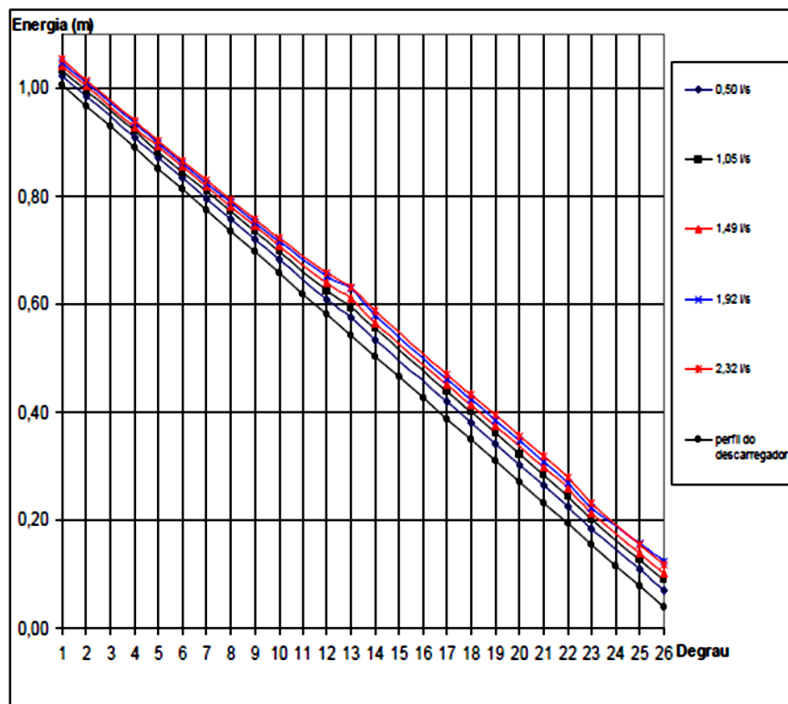


Figura 4.27. Perfil do descarregador e linhas de energia, obtidos por Ferreira (2009), para os caudais 0.50 L/s, 1.05 L/s, 1.49 L/s, 1.92 L/s e 2.32 L/s.

A comparação dos valores de Energia, traduzida pela razão (d) entre a Energia registada experimentalmente no descarregador de elevada rugosidade (E^*) e a registada no presente estudo (E), é apresentada no Quadro 4.16.

Quadro 4.16. Relação, d, entre a energia total registada experimentalmente por Ferreira (2009) e a encontrada no presente estudo.

Degraus	d = E^*/E									
	Caudal [L/s]									
	0,25	0,50	0,82	1,05	1,24	1,50	1,69	1,92	2,19	2,29
1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
3	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
4	1.00	1.00	1.00	0.98	0.97	0.96	0.96	0.96	0.95	0.95
5	1.00	1.00	0.98	0.97	0.95	0.95	0.93	0.91	0.90	0.84
6	1.00	1.00	0.99	0.98	0.97	0.95	0.95	0.93	0.93	0.93
7	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
8	1.00	1.00	0.98	0.96	0.95	0.93	0.90	0.91	0.90	0.88
9	1.00	0.99	0.97	*	0.92	0.93	0.91	0.93	0.91	0.91
10	1.00	0.99	0.96	0.93	0.93	0.92	0.91	0.91	0.91	0.91
11	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
12	0.99	0.96	0.94	0.95	0.95	0.93	0.94	0.93	0.91	0.93
13	0.98	0.96	0.92	0.93	0.92	0.89	0.90	0.90	0.87	0.88
14	0.99	0.96	0.94	0.93	0.92	0.89	0.88	0.88	0.85	0.87
15	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
16	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
17	0.99	*	0.93	0.91	0.87	0.88	0.86	0.87	0.84	0.83
18	0.97	0.94	0.93	0.89	0.84	0.85	0.85	0.84	0.82	0.82
19	0.98	0.92	0.92	0.88	0.85	0.83	0.82	0.82	0.78	0.80
20	0.99	0.93	0.89	0.87	0.82	*	0.84	0.82	*	0.81
21	0.98	0.91	0.88	0.83	0.79	0.81	0.80	0.80	0.81	*
22	0.97	0.95	0.90	0.86	0.82	0.83	0.85	0.84	0.82	0.81
23	0.99	0.84	0.83	*	0.65	0.70	0.75	0.70	0.66	0.70
24	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
25	0.94	0.81	0.78	0.71	0.67	0.65	0.65	0.67	0.65	0.61
26	0.88	0.71	0.69	0.60	0.57	0.50	0.55	0.57	0.54	0.51

Nas Figura 4.28 e Figura 4.29 encontram-se representada a relação E^* e E representativas das energias registadas nos estudos efectuados, respectivamente no estudo efectuado por Ferreira (2009) e no presente estudo.

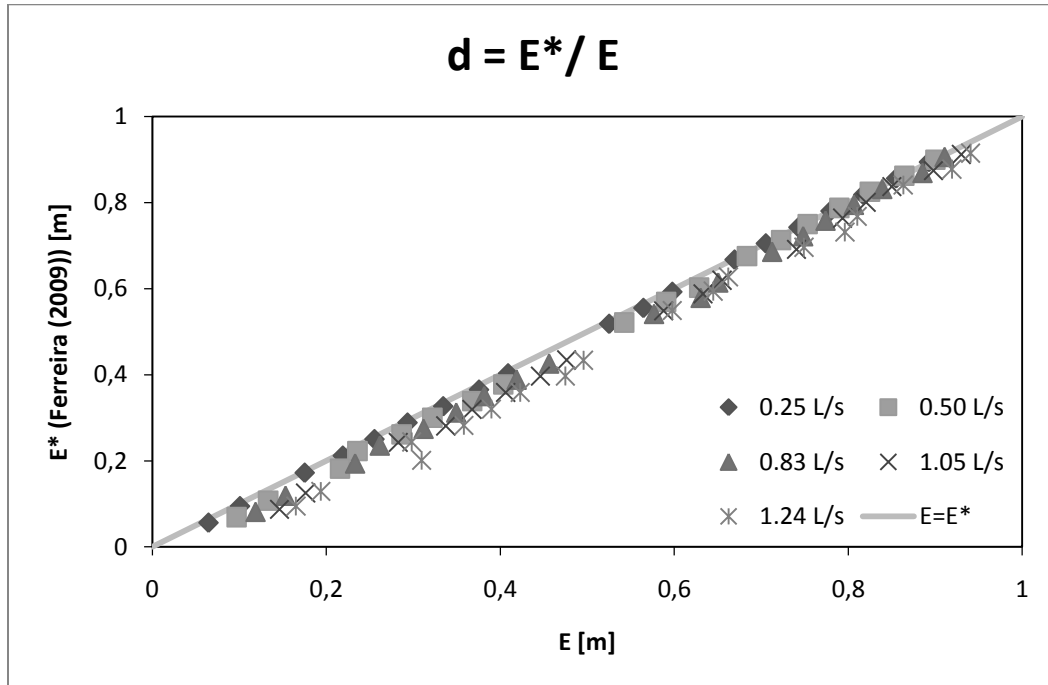


Figura 4.28. Relação, d , entre a energia total registada experimentalmente por Ferreira (2009) e a encontrada no presente estudo.

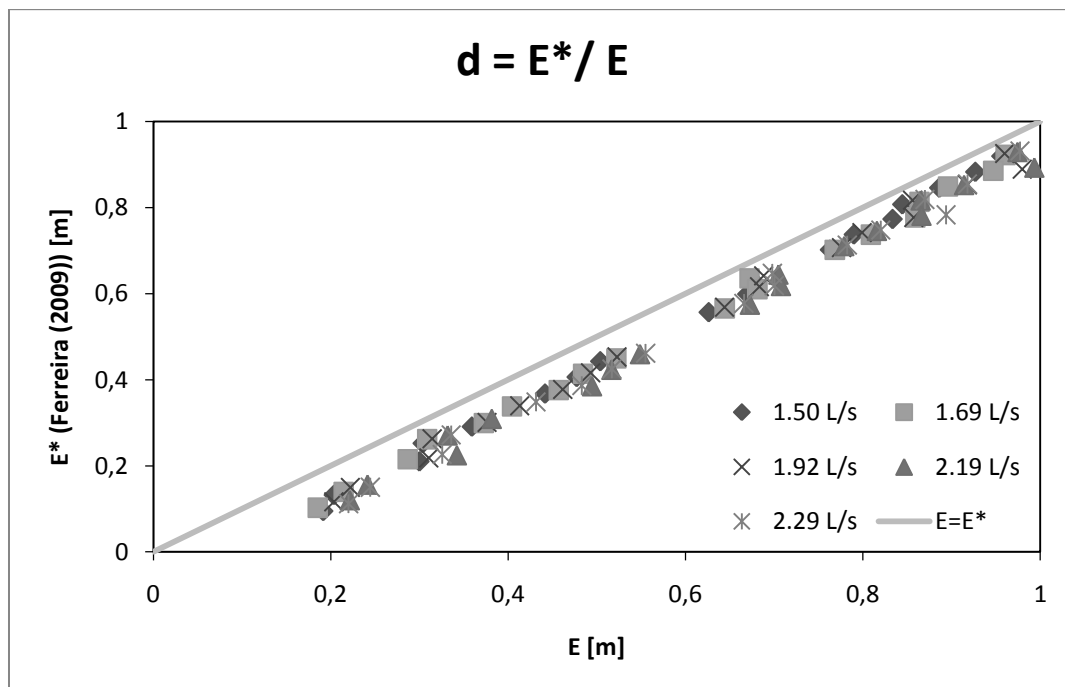


Figura 4.29 Relação, d , entre a energia total registada experimentalmente por Ferreira (2009) e a encontrada no presente estudo.

A linha de energia para uma gama de caudais semelhante à ensaiada, referente a um descarregador em degraus com troço convergente com rugosidade aparente das paredes mais elevada, apresenta diferenças comparativamente com o estudo presentemente efectuado mais consideráveis para caudais mais elevados. Verifica-se, para caudais mais baixos ou com regimes de escoamento com características de escoamento em quedas sucessivas, que a energia registada no descarregador com rugosidade mais elevada é aproximadamente a mesma da registada no presente estudo. Contudo para caudais superiores a relação verificada entre descarregador com rugosidade superior face ao presente caso de estudo, sofre diminuições. Os valores obtidos para a razão, d , encontram-se entre 1.00 e 0.6, de notar que a energia total registada para o caso do descarregador analisado no presente estudo é superior.

4.5.5 ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS VALORES DE DISSIPAÇÃO DE ENERGIA VERIFICADOS NO PRESENTE ESTUDO COM OS VERIFICADOS NO DESCARREGADOR DE RUGOSIDADE ELEVADA, FERREIRA (2009)

A análise comparativa da dissipação de energia entre o descarregador com geometria semelhante mas com rugosidade superior (estudo efectuado por Ferreira (2009)) e os valores experimentais do presente estudo, será abordada segundo duas vertentes. Numa primeira abordagem será avaliada a dissipação de energia total, numa segunda fase será avaliada a dissipação de energia verificada para cada degrau, tendo como referência a energia disponível no primeiro degrau.

No Quadro 4.17 são apresentados os valores de dissipação de energia total obtidos por Ferreira (2009), os valores obtidos no presente estudo, $\Delta E/Em$, e a razão, e . A relação entre os resultados experimentais obtidos nos dois estudos pode também ser visualizada na Figura 4.30.

Quadro 4.17. Comparação de dissipação de energia total entre aos dois descarregadores geometricamente semelhantes e com rugosidades diferentes.

Caudal [L/s]	0.25	0.5	0.83	1.05	1.24	1.50	1.69	1.92	2.19	2.29
$(\Delta E/Em)^*$	0,945	0,932	0,920	0,915	0,908	0,908	0,901	0,888	0,885	0,893
$\Delta E/Em$	0,937	0,905	0,884	0,858	0,840	0,815	0,821	0,804	0,788	0,789
$e = \frac{(\Delta E/Em)^*}{\Delta E/Em}$	1.01	1.03	1.04	1.07	1.08	1.11	1.10	1.10	1.12	1.13

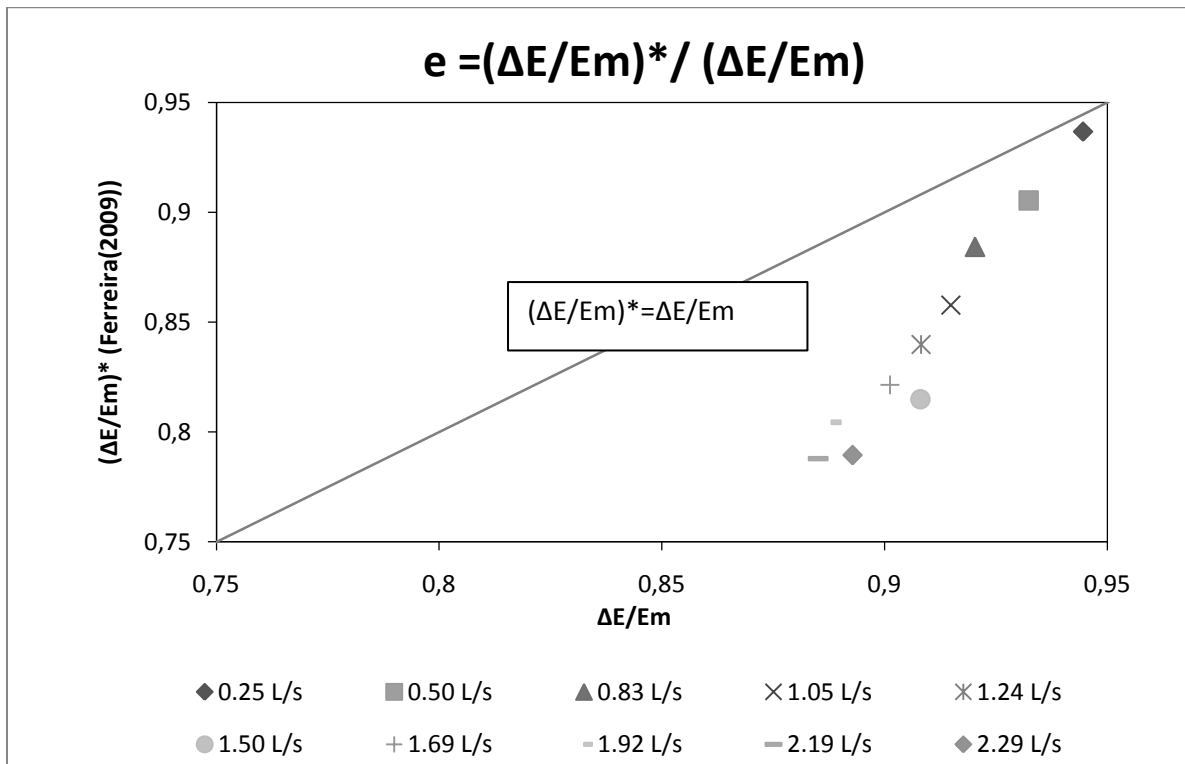


Figura 4.30. Relação, e, entre a dissipação de energia registada experimentalmente por Ferreira (2009) e a encontrada no presente estudo.

Através da análise da perda de energia é possível constatar que para os caudais mais baixos a dissipação de energia provocada pelo descarregador com rugosidade superior (Ferreira(2009)) é praticamente a mesma da verificada no presente caso de estudo.. Contudo para caudais superiores a diferença de energia conseguida no total no descarregador rugoso chega a atingir cerca de 13% da perda de energia verificada no presente caso de estudo.

Do Quadro 4.18 ao Quadro 4.22 serão apresentados os valores da dissipação de energia verificada degrau a degrau comparativamente com a energia máxima disponível, para os dois casos de descarregadores com troço convergentes e apresentando rugosidades diferentes. De notar que encontram-se identificados a cinzento os pontos de descontinuidade.

Quadro 4.18. Comparação entre a dissipação de energia verificada experimentalmente por Ferreira (2009) e os valores obtidos experimentalmente no actual estudo, para os caudais 0.25 L/s e 0.50 L/s.

Caudal [L/s]	0.25			0.50		
	$\left(\frac{\Delta E}{Em}\right)^*$	$\frac{\Delta E}{Em}$	$e = \frac{\left(\frac{\Delta E}{Em}\right)^*}{\frac{\Delta E}{Em}}$	$\left(\frac{\Delta E}{Em}\right)^*$	$\frac{\Delta E}{Em}$	$e = \frac{\left(\frac{\Delta E}{Em}\right)^*}{\frac{\Delta E}{Em}}$
1-2	*	*	*	*	*	*
1-3	*	*	*	*	*	*
1-4	0.122	0.121	1.01	0.119	0.119	1.00
1-5	0.160	0.158	1.01	0.156	0.154	1.01
1-6	0.197	0.195	1.01	0.192	0.193	1.00
1-7	0.234	0.232	1.01	0.229	0.227	1.01

Caudal [L/s]	0.25			0.50		
	$\left(\frac{\Delta E}{Em}\right)^*$	$\frac{\Delta E}{Em}$	$e = \frac{\left(\frac{\Delta E}{Em}\right)^*}{\frac{\Delta E}{Em}}$	$\left(\frac{\Delta E}{Em}\right)^*$	$\frac{\Delta E}{Em}$	$e = \frac{\left(\frac{\Delta E}{Em}\right)^*}{\frac{\Delta E}{Em}}$
1-8	0.271	0.269	1.01	0.265	0.263	1.01
1-9	0.308	0.306	1.01	0.302	0.292	1.03
1-10	0.345	0.341	1.01	0.338	0.331	1.02
1-11	*	*	*	*	*	*
1-12	0.418	0.411	1.02	0.410	0.385	1.07
1-13	0.455	0.444	1.02	0.443	0.422	1.05
1-14	0.491	0.483	1.02	0.489	0.469	1.04
1-15	*	*	*	*	*	*
1-16	*	*	*	*	*	*
1-17	0.604	0.597	1.01	*	*	*
1-18	0.641	0.630	1.02	0.630	0.605	1.04
1-19	0.679	0.671	1.01	0.668	0.640	1.04
1-20	0.716	0.711	1.01	0.706	0.685	1.03
1-21	0.754	0.749	1.01	0.744	0.720	1.03
1-22	0.792	0.785	1.01	0.782	0.769	1.02
1-23	0.831	0.828	1.00	0.822	0.789	1.04
1-24	*	*	*	*	*	*
1-25	0.907	0.901	1.01	0.895	0.870	1.03
1-26	0.945	0.937	1.01	0.932	0.905	1.03

Quadro 4.19. Comparação entre a dissipação de energia verificada experimentalmente por Ferreira (2009) e os valores obtidos experimentalmente no actual estudo, para os caudais 0.83 L/s e 1.05 L/s.

Caudal [L/s]	0.83			1.05		
	$\left(\frac{\Delta E}{Em}\right)^*$	$\frac{\Delta E}{Em}$	$e = \frac{\left(\frac{\Delta E}{Em}\right)^*}{\frac{\Delta E}{Em}}$	$\left(\frac{\Delta E}{Em}\right)^*$	$\frac{\Delta E}{Em}$	$e = \frac{\left(\frac{\Delta E}{Em}\right)^*}{\frac{\Delta E}{Em}}$
1-2	*	*	*	*	*	*
1-3	*	*	*	*	*	*
1-4	0.114	0.111	1.03	0.113	0.094	1.20
1-5	0.150	0.136	1.11	0.149	0.125	1.19
1-6	0.187	0.181	1.03	0.185	0.172	1.08
1-7	0.223	0.213	1.05	0.221	0.201	1.10
1-8	0.259	0.245	1.06	0.257	0.227	1.13
1-9	0.294	0.270	1.09	*	*	*
1-10	0.330	0.305	1.08	0.327	0.279	1.17
1-11	*	*	*	*	*	*
1-12	0.399	0.365	1.09	0.397	0.362	1.10
1-13	0.434	0.385	1.13	0.428	0.383	1.12

Caudal [L/s]	0.83			1.05		
	$\left(\frac{\Delta E}{Em}\right)^*$	$\frac{\Delta E}{Em}$	$e = \frac{\left(\frac{\Delta E}{Em}\right)^*}{\frac{\Delta E}{Em}}$	$\left(\frac{\Delta E}{Em}\right)^*$	$\frac{\Delta E}{Em}$	$e = \frac{\left(\frac{\Delta E}{Em}\right)^*}{\frac{\Delta E}{Em}}$
1-14	0.471	0.437	1.08	0.466	0.428	1.09
1-15	*	*	*	*	*	*
1-16	*	*	*	*	*	*
1-17	0.583	0.555	1.05	0.577	0.536	1.08
1-18	0.620	0.591	1.05	0.614	0.566	1.09
1-19	0.657	0.628	1.05	0.651	0.605	1.08
1-20	0.695	0.659	1.05	0.689	0.642	1.07
1-21	0.732	0.696	1.05	0.727	0.672	1.08
1-22	0.770	0.745	1.03	0.764	0.725	1.05
1-23	0.810	0.773	1.05	*	*	*
1-24	*	*	*	*	*	*
1-25	0.884	0.851	1.04	0.878	0.829	1.06
1-26	0.920	0.884	1.04	0.915	0.858	1.07

Quadro 4.20. Comparação entre a dissipação de energia verificada experimentalmente por Ferreira (2009) e os valores obtidos experimentalmente no actual estudo, para os caudais 1.24 L/s e 1.50 L/s.

Caudal [L/s]	1.24			1.50		
	$\left(\frac{\Delta E}{Em}\right)^*$	$\frac{\Delta E}{Em}$	$e = \frac{\left(\frac{\Delta E}{Em}\right)^*}{\frac{\Delta E}{Em}}$	$\left(\frac{\Delta E}{Em}\right)^*$	$\frac{\Delta E}{Em}$	$e = \frac{\left(\frac{\Delta E}{Em}\right)^*}{\frac{\Delta E}{Em}}$
1-2	*	*	*	*	*	*
1-3	*	*	*	*	*	*
1-4	0.113	0.087	1.30	0.112	0.075	1.49
1-5	0.149	0.108	1.38	0.148	0.104	1.43
1-6	0.184	0.162	1.14	0.183	0.143	1.28
1-7	*	*	*	0.221	0.183	1.20
1-8	0.255	0.213	1.20	0.253	0.194	1.31
1-9	0.290	0.227	1.28	0.288	0.236	1.22
1-10	0.325	0.273	1.19	0.322	0.262	1.23
1-11	*	*	*	*	*	*
1-12	0.391	0.357	1.10	0.392	0.346	1.14
1-13	0.423	0.374	1.13	0.422	0.352	1.20
1-14	0.467	0.420	1.11	0.462	0.394	1.17
1-15	*	*	*	*	*	*
1-16	*	*	*	*	*	*
1-17	0.579	0.519	1.12	0.572	0.513	1.12
1-18	0.615	0.539	1.14	0.608	0.538	1.13
1-19	0.652	0.590	1.11	0.645	0.573	1.13
1-20	0.689	0.622	1.11	1.000	0.623	1.60

Caudal [L/s]	1.24			1.50		
	$\left(\frac{\Delta E}{Em}\right)^*$	$\frac{\Delta E}{Em}$	$e = \frac{\left(\frac{\Delta E}{Em}\right)^*}{\frac{\Delta E}{Em}}$	$\left(\frac{\Delta E}{Em}\right)^*$	$\frac{\Delta E}{Em}$	$e = \frac{\left(\frac{\Delta E}{Em}\right)^*}{\frac{\Delta E}{Em}}$
1-21	0.726	0.652	1.11	0.719	0.653	1.10
1-22	0.763	0.711	1.07	0.756	0.706	1.07
1-23	0.805	0.700	1.15	0.797	0.710	1.12
1-24	*	*	*	*	*	*
1-25	0.875	0.812	1.08	0.872	0.803	1.09
1-26	0.908	0.840	1.08	0.908	0.815	1.11

Quadro 4.21. Comparação entre a dissipação de energia verificada experimentalmente por Ferreira (2009) e os valores obtidos experimentalmente no actual estudo, para os caudais 1.69 L/s e 1.92 L/s.

Caudal [L/s]	1.69			1.92		
	$\left(\frac{\Delta E}{Em}\right)^*$	$\frac{\Delta E}{Em}$	$e = \frac{\left(\frac{\Delta E}{Em}\right)^*}{\frac{\Delta E}{Em}}$	$\left(\frac{\Delta E}{Em}\right)^*$	$\frac{\Delta E}{Em}$	$e = \frac{\left(\frac{\Delta E}{Em}\right)^*}{\frac{\Delta E}{Em}}$
1-2	*	*	*	*	*	*
1-3	*	*	*	*	*	*
1-4	0.112	0.073	1.52	0.11	0.08	1.43
1-5	0.147	0.087	1.69	0.15	0.06	2.52
1-6	0.182	0.136	1.34	0.18	0.12	1.54
1-7	0.217	0.167	1.30	0.22	0.18	1.22
1-8	0.251	0.171	1.47	0.25	0.18	1.44
1-9	0.290	0.220	1.32	0.29	0.23	1.24
1-10	0.324	0.259	1.25	0.32	0.25	1.26
1-11	*	*	*	*	*	*
1-12	0.388	0.352	1.10	0.38	0.34	1.13
1-13	0.412	0.343	1.20	0.41	0.34	1.19
1-14	0.455	0.379	1.20	0.45	0.38	1.19
1-15	*	*	*	*	*	*
1-16	*	*	*	*	*	*
1-17	0.567	0.497	1.14	0.56	0.50	1.14
1-18	0.601	0.533	1.13	0.60	0.53	1.14
1-19	0.638	0.559	1.14	0.64	0.56	1.15
1-20	0.675	0.610	1.11	0.67	0.60	1.12
1-21	0.712	0.641	1.11	0.71	0.64	1.11
1-22	0.748	0.702	1.06	0.75	0.70	1.07
1-23	0.793	0.724	1.10	0.79	0.70	1.13
1-24	*	*	*	*	*	*
1-25	0.866	0.793	1.09	0.86	0.79	1.09
1-26	0.901	0.821	1.10	0.89	0.80	1.10

Quadro 4.22. Comparação entre a dissipação de energia verificada experimentalmente por Ferreira (2009) e os valores obtidos experimentalmente no actual estudo, para os caudais 2.19 L/s e 2.29 L/s.

Caudal [L/s]	2.19			2.29		
	$\left(\frac{\Delta E}{Em}\right)^*$	$\frac{\Delta E}{Em}$	$e = \frac{\left(\frac{\Delta E}{Em}\right)^*}{\frac{\Delta E}{Em}}$	$\left(\frac{\Delta E}{Em}\right)^*$	$\frac{\Delta E}{Em}$	$e = \frac{\left(\frac{\Delta E}{Em}\right)^*}{\frac{\Delta E}{Em}}$
1-2	*	*	*	*	*	*
1-3	*	*	*	*	*	*
1-4	0.11	0.07	1.66	0.11	0.06	1.69
1-5	0.14	0.05	3.01	*	*	*
1-6	0.18	0.12	1.48	0.18	0.12	1.51
1-7	0.22	0.17	1.27	0.22	0.17	1.30
1-8	0.25	0.17	1.48	0.25	0.14	1.74
1-9	0.29	0.22	1.31	0.29	0.22	1.33
1-10	0.32	0.25	1.26	0.32	0.25	1.27
1-11	*	*	*	*	*	*
1-12	0.38	0.32	1.18	0.38	0.33	1.15
1-13	0.41	0.32	1.27	0.41	0.33	1.24
1-14	0.45	0.36	1.27	0.45	0.36	1.24
1-15	*	*	*	*	*	*
1-16	*	*	*	*	*	*
1-17	0.56	0.47	1.18	0.56	0.47	1.19
1-18	0.59	0.51	1.18	0.59	0.51	1.18
1-19	0.63	0.53	1.20	0.63	0.54	1.17
1-20	*	*	*	0.67	0.59	1.14
1-21	0.70	0.63	1.11	*	*	*
1-22	0.74	0.68	1.09	0.74	0.68	1.09
1-23	0.79	0.67	1.17	0.78	0.69	1.14
1-24	*	*	*	*	*	*
1-25	0.85	0.77	1.11	0.86	0.77	1.12
1-26	0.89	0.79	1.12	0.89	0.79	1.13

Da análise da dissipação de energia degrau a degrau é possível verificar que, para os três primeiros caudais, cujo escoamento se verificou na sua maioria escoamento em quedas sucessivas, as diferenças de energia registadas entre a energia máxima e a energia do degrau para os dois descarregadores são praticamente coincidentes. Para o caudal de 0.83 L/s verifica-se que o descarregador com maior rugosidade apresenta uma maior capacidade de dissipação de energia atingindo cerca de 9% da dissipação verificada no presente estudo, sendo que este valor é atingindo na zona de convergência.

Para os caudais cujo escoamento dominante é escoamento deslizante sobre turbilhões, a dissipação de energia verificada na zona convergente, resultante do estudo referente ao descarregador de maior rugosidade, é bastante superior à verificada no presente estudo. Contudo a relação entre a dissipação de energia nos dois casos é tanto maior quanto mais a jusante é avaliada, sendo que na zona de largura constante a diferença tende a uniformizar.

Para os caudais cujo regime foi considerado transitório, estas características acima marcadas para o EDT e EQS não são tão notórias. O caudal 1.05 L/s apresenta para o descarregador rugoso, dissipação de energia da ordem dos 8% face ao registado no presente estudo, sendo que a relação entre os dois estudos é superior para os primeiros degraus pertencentes à zona convergentes, tendendo a uniformizar para os degraus mais a jusante. O caudal 1.24L/s por sua vez apresenta diferenças mais marcadas na zona de convergência face ao anterior, contudo tende a estabilizar os valores de dissipação de energia obtidos pelo descarregador com rugosidade superior em cerca de 11% ainda na zona de convergência mantendo depois essa relação média.

4.5.6 ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS VALORES DE DISSIPACÃO DE ENERGIA OBTIDOS EXPERIMENTALMENTE E OS PROPOSTOS PELOS DIVERSOS AUTORES

A dissipação de energia tem vindo a ser estudada ao longo do tempo pela sua importância na caracterização dos descarregadores de cheia em degraus uma vez que esta é uma das principais funções deste tipo de órgão descarregador. No capítulo 2 foram apresentados alguns dos estudos mais relevantes nesta temática, os quais serão objecto de comparação com os registos práticos encontrados.

Os estudos apresentados surgiram de estudos efectuados em descarregadores de largura constante e segundo o princípio de que o escoamento ao longo do descarregador atinge o regime uniforme.

No que se refere à consideração de regime uniforme, foram apresentadas fórmulas por Ohtsu et al. (2004) no qual é possível encontrar uma altura de água base para o início de escoamento uniforme. Contudo a proposta apresentada, tem por base um descarregador não convergente, o que faz com que a garantia de regime uniforme não seja de todo comparável. Como tal no presente trabalho será admitido que em todos os caudais o regime uniforme é atingido.

As propostas de cálculo apresentadas por Chanson (1994) e Stephenson (2001), representadas nas expressões (2.32, 2.33 e 2.34) traduzem a dissipação de energia através da razão $\Delta E/Em$, onde ΔE representa a diferença entre a energia de montante e a energia residual no ponto a considerar e Em a energia existente a montante. As expressões acima descritas estão dependentes do regime de escoamento ao qual são aplicáveis, sendo que expressão (2.32) aplicável a EQS e expressões (2.33) e (2.34) aplicáveis a EDT.

O cálculo da dissipação de energia através da proposta de Chanson (1994), representada pela expressão (2.32) depende da relação (hc/H) e (Hv/hc) , onde hc representa a altura crítica do escoamento, H a altura geométrica do degrau e Hv a altura total do descarregador medida desde a crista até à bacia de dissipação.

Quando o regime de escoamento apresenta características de EDT a formulação proposta por Chanson (1994) e Stephenson (2001) depende do factor de resistência (f), da relação entre as alturas (Hv , hc) e de α que representa o ângulo formado entre o pseudo-fundo e o plano horizontal de referência.

A teoria apresentada por André e Ramos (2004) parte do princípio apresentado por Stephenson (2001) e Chanson (1994) para escoamento deslizante sobre turbilhões. Os autores quantificam a dissipação de energia pela razão $Er/H_{m\acute{a}x}$ entre a energia específica residual do escoamento (Er) pela energia máxima ($H_{m\acute{a}x}$), sendo $H_{m\acute{a}x}$ dado por $H_{m\acute{a}x}=H_{vi}+1.5*hc$, onde H_{vi} representa a altura medida entre a crista e a soleira da secção de jusante.

Devido à variação do regime de escoamento ao longo do descarregador consoante o caudal escoado, a escolha da expressão a aplicar para comparação teórico/experimental não é linear. Como tal, a escolha

baseou-se no observado experimentalmente no que diz respeito ao regime de escoamento verificado, sendo aplicada para cada caudal médio a expressão que se adequa ao escoamento dominante.

À semelhança do que foi adoptado na análise do escoamento de transição para as outras variáveis já apresentadas, serão aplicadas duas situações possíveis de análise deste tipo de escoamento tentando com isto encontrar a melhor forma de o tratar. Como tal para a análise comparativa com as soluções propostas relativas caudais que maioritariamente apresentam escoamento de transição (1.24 L/s e 1.50L/s) serão aplicadas quer as expressões relativas a escoamento de quedas sucessivas que as relativas a escoamento deslizante sobre turbilhões. A notação adoptada para distinguir as propostas de Chanson (1994) e Stephenson (2001) será respectivamente: $\frac{\Delta E}{Em} 1$ e $\frac{\Delta E}{Em} 2$. Quanto à distinção entre a formulação de Chanson (1994) para EQS e EDT será adoptada para o EQS a notação: $\frac{\Delta E}{Em} 1^*$. Para distinção entre o proposto por André e Ramos e o obtido experimentalmente será adoptada como notação para os valores sugeridos por estes autores: $\frac{Er}{H_{m\acute{a}x}}^*$.

Apresenta-se no Quadro 4.23 uma síntese das propostas aplicadas a cada caudal assim como a indicação do regime dominante.

Quadro 4.23. Síntese das comparações a efectuar relativamente ao proposto pelas referências e o obtido experimentalmente.

Caudal [L/s]	Regime de escoamento dominante	Teorias aplicáveis	Autores
0.25	Escoamento em quedas sucessivas	$\frac{\Delta E}{Em} 1^*$	Chanson (1994)
0.50			
0.82			
1.05	Escoamento de transição	$\frac{\Delta E}{Em} 1^*$	Chanson (1994)
		$\frac{\Delta E}{Em} 1$	Chanson (1994)
		$\frac{\Delta E}{Em} 2$	Stephenson (2001)
1.24		$\frac{Er}{H_{m\acute{a}x}}^*$	André e Ramos (2004)
1.50		$\frac{\Delta E}{Em} 1$	Chanson (1994)
1.69	Escoamento deslizante sobre turbilhões	$\frac{\Delta E}{Em} 2$	Stephenson (2001)
1.92			
2.19		$\frac{Er}{H_{m\acute{a}x}}^*$	André e Ramos (2004)
2.29			

Como ponto comum às teorias apresentadas por André e Ramos (2004), Chanson (1994) e Stephenson(2001), aplicáveis a regime de escoamento deslizante sobre turbilhões, existe o factor de resistência de Darcy-Weisbach (f).

Como já referido, o factor de resistência (f) apresenta valores muito variáveis e como tal, será feita uma análise comparativa entre os valores propostos no (Quadro 2.1) com a proposta de cálculo

apresentada na expressão (2.30), visto que as restantes expressões apresentam condicionantes que não se enquadram com o actual estudo.

A referida expressão (2.30) é dependente da altura média de água que por sua vez é dependente do caudal escoado e da secção em análise como tal o factor de resistência, f , é variável de degrau para degrau e de caudal para caudal. Por outro lado, como já foi referido, condição de aplicação da expressão (2.30), é a existência de regime de escoamento com características de escoamento deslizante sobre turbilhões. Sendo assim o factor f , característico de cada caudal ensaiado, será um valor médio da aplicação da expressão (2.30) a todos os degraus em que se tenha verificado escoamento com características de deslizante sobre turbilhões.

Como referido anteriormente, o estudo do escoamento de transição passa pela aplicação das expressões características do Escoamento deslizante sobre turbilhões, como tal, torna-se necessário o conhecimento do factor f característico para os caudais que na sua maioria apresentam escoamento de transição.

Sendo assim serão avaliadas duas situações possíveis de cálculo do factor f médio, referente a cada caudal:

- Calculo de f médio para os caudais que na sua maioria apresentam EDT (1.50L/s, 1.69L/s, 1.92L/s, 2.19L/s, 2.29L/s) contabilizando para a média os degraus que apresentam como regime de escoamento deslizante sobre turbilhões;
- Calculo de f médio para os caudais que na sua maioria apresentam escoamento deslizante sobre turbilhões e escoamento de transição (1.05L/s, 1.24 L/s, 1.50L/s, 1.69L/s, 1.92L/s, 2.19L/s, 2.29L/s) contabilizando para a média os degraus que apresentem regimes de escoamento de transição e escoamento deslizante sobre turbilhões.

Com as duas considerações foi possível proceder à comparação com os resultados propostos, tentando com isto encontrar a melhor forma de enquadrar o regime de transição.

No Quadro 4.24 são apresentados os valores médios obtidos no cálculo do factor de resistência pelas duas considerações possíveis, adoptando uma rugosidade (k) de 0.75 e aplicando a expressão (2.30).

Quadro 4.24. Factor de resistência (f) segundo Stephenson, para uma rugosidade aparente de 0.75.

f (Stephenson)	TRA				EDT		
Caudal	1.05 L/s	1.24 L/s	1.50 L/s	1.69 L/s	1.92 L/s	2.19 L/s	2.29 L/s
Sem considerar TRA	*	*	0.047	0.045	0.045	0.044	0.043
Com consideração TRA	0.053	0.052	0.050	0.049	0.047	0.046	0.045

Através do Quadro 4.24 é possível constatar que os valores apresentados para a gama de caudais médios ensaiados são muito semelhantes aos valores de f apresentado por André e Ramos (2004). É de ter em atenção o facto de os factores de resistência encontrados por outros autores se basearem em descarregadores com configurações e materiais distintos do actual o que leva a valores de f bastante diferentes dos apresentados.

Para comparação dos valores experimentais com os propostos pelos diversos autores apenas serão avaliados os valores obtidos de dissipação de energia total verificada entre o degrau 1 e o degrau 26 referentes aos valores de f obtidos através da expressão (2.30), sendo que os restantes encontram-se apresentados no ANEXO III.

No Quadro 4.25 e Quadro 4.26 é possível visualizar, para cada caudal médio os resultados experimentais da razão $\Delta E/Em$ e $Er/H_{m\acute{a}x}$ obtidos experimentalmente entre os degraus 1 e 26, assim como os propostos pelos estudos anteriormente referidos. É também apresentado o desvio percentual em relação aos valores obtidos experimentalmente.

Quadro 4.25. Dissipação de energia obtida experimentalmente comparativamente com a esperada segundo os autores referenciados, sendo TRA equiparado a EQS.

TRA como EQS										
Caudal [L/s]	0.25	0.5	0.83	1.05	1.24	1.5	1.69	1.92	2.19	2.29
f	*	*	*	*	*	0.047	0.045	0.045	0.044	0.043
$\frac{Er}{H_{m\acute{a}x}}$	*	*	*	*	*	0.192	0.185	0.203	0.220	0.243
$\frac{\Delta E}{Em}$	0.937	0.905	0.884	0.839	0.858	0.840	0.815	0.822	0.805	0.789
$\frac{\Delta E}{Em} (1^*)$	0.967 -3%	0.958 -5%	0.950 -7%	0.945 -11%	0.942 -9%	* *	* *	* *	* *	* *
$\frac{\Delta E}{Em} (1)$	* *	* *	* *	* *	* *	0.819 3%	0.799 2%	0.782 5%	0.759 6%	0.748 5%
$\frac{Er^*}{H_{m\acute{a}x}}$	* *	* *	* *	* *	* *	0.181 6%	0.201 -8%	0.218 -7%	0.241 -9%	0.251 -3%
$\frac{\Delta E}{Em} (2)$	* *	* *	* *	* *	* *	0.813 3%	0.792 3%	0.773 6%	0.749 7%	0.737 7%

Quadro 4.26. Dissipação de energia obtida experimentalmente comparativamente com a esperada segundo os autores referenciados, sendo TRA equiparado a EDT.

TRA como EDT										
Caudal [L/s]	0.25	0.5	0.83	1.05	1.24	1.5	1.69	1.92	2.19	2.29
f	*	*	*	0.053	0.052	0.05	0.049	0.047	0.046	0.045
$\frac{Er}{H_{m\acute{a}x}}$	*	*	*	0.148	0.166	0.192	0.185	0.203	0.220	0.243
$\frac{\Delta E}{Em}$	0.937	0.905	0.884	0.839	0.858	0.840	0.815	0.822	0.805	0.789
$\frac{\Delta E}{Em} (1^*)$	0.967 -3%	0.958 -5%	0.950 -7%	* *	* *	* *	* *	* *	* *	* *
$\frac{\Delta E}{Em} (1)$	* *	* *	* *	0.867 -3%	0.850 1%	0.826 2%	0.809 6%	0.788 4%	0.766 5%	0.756 4%
$\frac{Er^*}{H_{m\acute{a}x}}$	* *	* *	* *	0.133 10%	0.150 10%	0.174 10%	0.190 14%	0.220 -9%	0.240 -9%	0.254 -4%
$\frac{\Delta E}{Em} (2)$	* *	* *	* *	0.863 -3%	0.845 1%	0.820 2%	0.803 2%	0.779 5%	0.756 6%	0.745 6%

Do Quadro 4.25 verifica-se que para o escoamento em quedas sucessivas diferença entre $\Delta E/Em$ e proposta de Chanson (1994) ($\Delta E/Em$ (1*)) para as características de escoamento em causa apresentam-se pouco significativas, crescendo com o aumento do caudal, contudo mesmo para o caudal de 0.83L/s o valor de $\Delta E/Em$ (1*) é superior em apenas 7%. Para o escoamento de transição, considerando que este apresenta as mesmas características do EQS, logo sendo aplicado a proposta de Chanson (1994) para este tipo de escoamento verificam-se diferenças superiores sendo estas de 11% e 9% relativamente ao experimental. Quanto aos caudais que apresentam na sua maioria EDT, as diferenças face aos valores registados experimentalmente são muito pouco significativas.

A proposta de Chanson (1994) apresenta melhores aproximações enquanto os desfasamentos mais significativos são os relativos à proposta de André e Ramos.

No Quadro 4.26, são apresentados os valores relativos à consideração de Escoamento de transição como Escoamento em deslizante sobre turbilhões. De notar que com esta consideração o proposto para os caudais que apresentam na sua maioria o escoamento em quedas sucessivas, não sofre qualquer variação face.

Relativamente ao escoamento em quedas sucessivas, as propostas de Chanson (1994) e Stephenson (2001) apresentam diferenças pouco significativas na comparação das duas considerações adoptadas. Contudo a proposta defendida por André e Ramos (2004) apresenta valores relativamente inferiores na consideração de Escoamento deslizante sobre turbilhões e escoamento de transição, sendo a diferença menos notória para os caudais mais elevados.

Comparativamente com o obtido experimentalmente para toda a gama de caudais as propostas de Chanson (1994) e Stephenson (2001) são as que apresentam menores diferenças face aos valores obtidos, sendo que as que se assemelham mais aos valores experimentais resultam da consideração do regime transitório como tendo características de escoamento deslizante sobre turbilhões.

A proposta de André e Ramos (2004) aplicada ao presente estudo apresenta maiores desfasamentos. Sendo que estes são superiores quando escoamento transitório assume as características de escoamento deslizante sobre turbilhões.

5

CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

5.1 CONCLUSÕES

Para melhor conhecer a dissipação de energia num descarregador de cheias em canal não convencional, realizado em betão, procedeu-se neste trabalho a análise em modelo físico de um tal descarregador.

O modelo físico utilizado foi o modelo do descarregador de cheias em canal convergente, em betão, em degraus existente no Laboratório de Hidráulica e Recursos Hídricos e Ambiente da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, no qual foi possível estudar algumas das características principais do escoamento e retirar conclusões sobre a dissipação de comparativamente com outros estudos realizados dentro do tema.

Para o estudo da dissipação de energia e análise o escoamento associado foram ensaiados 10 caudais para os quais se determinaram as alturas de água médias associadas a cada degrau. Para tal, foram consideradas duas hipóteses de medição distintas: uma utilizando tubos piezométricos colocados em tomadas de pressão situadas nos patamares dos degraus e nas paredes do descarregador e outra através da utilização de um sistema de flutuador. Os valores de caudais escolhidos foram os mesmos que utilizados em Ferreira (2009) possibilitando a comparação dos dois estudos

A emulsão de ar na água, fenómeno característico deste tipo de escoamento, impossibilitou as medições de altura de água através dos tubos piezométricos ao longo do canal, excepção feita ao primeiro degrau para o qual não se verifica a emulsão de ar na água.

A análise dos resultados obtidos foi feita de duas formas distintas. Numa primeira fase procedeu-se à comparação das características do escoamento no descarregador em estudo com as de um descarregador de dimensões idênticas, mas apresentando elevada rugosidade de paredes, analisado em Ferreira (2009). Numa segunda fase os resultados obtidos foram comparados com os obtidos através de propostas de vários autores sobre o mesmo tema.

A comparação entre características de escoamento ocorrentes no descarregador em estudo e no descarregador rugoso estudado por Ferreira (2009) permitiu concluir que o escoamento deslizante sobre turbilhões é atingido para caudais mais baixos, em descarregadores de maior rugosidade (estudado por Ferreira (2009)).

Relativamente às alturas de água determinadas em cada degrau, a sua comparação com os valores referidos no estudo de Ferreira (2009) permite concluir que a tendência de aumento é semelhante. É de salientar que em ambos os casos se verificaram acréscimos de altura de água mais significativos na zona convergente.

Os valores das alturas médias de água registadas, assim como o seu crescimento associado aos dois tipos de descarregadores em comparação, terão influência nas velocidades de escoamento. Os valores registados das velocidades médias em cada secção, ao longo do descarregador permitiram verificar que existe um aumento mais acentuado na zona de convergência e após essa zona a velocidade tende a estabilizar. Comparativamente com os resultados obtidos para o modelo com semelhante geometria, mas com rugosidade superior, as velocidades registadas no presente estudo são superiores para todos os caudais, justificado pelo facto de rugosidade superior conduzir a alturas de água superior que por sua vez levam para a mesma secção e mesmo caudal a velocidades inferiores. A razão encontrada entre os valores resultados experimentais obtidos através do estudo efectuado por Ferreira (2009) e o presente estudo varia de 0.30 a 0.70, sendo tanto menor quanto maior for a gama de caudais.

A linha de energia, como esperado para este tipo de descarregador é decrescente, sendo o decréscimo menos acentuado na zona convergente.

Relativamente a perdas de energia, a comparação entre o estudo efectuado por Ferreira (2009), para descarregador semelhante com maior rugosidade, e o presente estudo levou à conclusão que, para caudais mais baixos (escoamento em quedas sucessivas) a perda de energia registada no descarregador com rugosidade superior é aproximadamente a mesma da registada no presente estudo.

Para caudais mais elevados, a diferença entre valores de energia dissipada entre os dois descarregadores é mais significativa, o descarregador mais rugoso apresenta uma maior eficiência na dissipação de energia. Para o máximo caudal estudado, a percentagem de energia dissipada no descarregador com rugosidade é de 89% enquanto que no presente caso é de 79%.

Uma análise mais pormenorizada da dissipação de energia ao longo dos dois descarregadores, através da análise da energia dissipada até determinado degraú, permitiu constatar que para os três primeiros caudais, cujo escoamento se verificou na sua maioria escoamento em quedas sucessivas, a percentagem de energia dissipada registada para os dois descarregadores é praticamente coincidente. Para os caudais de valor superior, verifica-se que na zona convergente as diferenças de percentagem de energias dissipadas entre os dois descarregadores é mais notória que na zona de largura constante para esses mesmos descarregadores.

Para os caudais correspondentes ao regime transitório, as características de dissipação de energia, acima marcadas para o EDT e EQS não são tão notórias. Sendo que as características da dissipação de energia assemelham-se no caso do caudal mais baixo as verificadas para escoamento em quedas sucessivas e o caudal superior apresenta características mais aproximadas às encontradas para o escoamento em quedas sucessivas, onde a dissipação de energia na zona convergente é mais significativa.

Na segunda fase da análise de resultados procedeu-se à comparação entre resultados experimentais obtidos e os propostos na literatura. Para descarregadores convergentes é possível concluir que, para caudais mais baixos, a mudança de regime de escoamento coincide praticamente com a proposta por Fael (2000), Ohtsu et al (2001), Chanson (2001), Chanson e Toombes (2004) e Fael, Pinheiro (2006).

Para caudais intermédios (1.05 L/s e 1.24 L/s) a mudança de regime de escoamento em quedas sucessivas para escoamento de transição acontece para degraus mais a montante do que o esperado. Contudo este facto pode ser justificado pelo facto de as expressões apresentadas pelos referidos autores terem como pressuposto a aplicação a descarregadores de largura constante. Para caudais elevados ensaiados superiores a 1.24 L/s, verifica-se que os limites propostos são muito aproximados aos verificados experimentalmente, independentemente de o descarregador ser ou não convergente. É

importante notar que em descarregadores convergentes a zona de regime transitório é superior relativamente aos descarregadores de largura constante.

Quando se analisa o valor da energia dissipada surgem da revisão bibliográfica, três propostas referentes a Chanson (1994), Stephenson (2001) e André e Ramos (2004), cuja aplicação depende do regime de escoamento ao longo do descarregador.

Os resultados obtidos no presente estudo, para o regime de escoamento em quedas sucessivas, são concordantes com os valores apresentados por Chanson (1994) para descarregadores sem convergência.

Relativamente à gama de caudais que maioritariamente correspondiam ao escoamento deslizante sobre turbilhões, a expressão de Chanson (1994) apresenta melhores aproximações enquanto a proposta por André e Ramos (2004) apresenta diferenças superiores

O factor de resistência utilizado no presente estudo baseou-se na formulação sugerida por Stephenson (2001) o qual foi comparado com valores propostos por outros autores. Os valores medidos no presente caso estão em concordância com os apresentados por André e Ramos (2004). É de ter em atenção o facto de os factores de resistência determinados por outros autores alvo de referência, se basearem em descarregadores com configurações e materiais distintos.

Para o escoamento de transição, considerando que este apresenta as mesmas características do escoamento em quedas sucessivas, a aplicação da expressão proposta por Chanson (1994), sendo que para este regime de escoamento conduz a diferenças de cerca de 10% relativamente aos resultados experimentais obtidos. Quando o escoamento de transição assume as características de escoamento deslizante sobre turbilhões foram aplicadas as relações retiradas de Chanson (1994), Stephenson (2001) e André e Ramos (2004), as quais conduziram a diferenças da mesma ordem de grandeza. A que mais se adequa nos dois casos é a proposta de Chanson (1994).

Pode-se concluir que de uma forma geral o trabalho permitiu uma caracterização do escoamento que possibilitou a comparação com trabalhos anteriores e propostas existentes na literatura sobre o mesmo tema, permitindo aprofundar os conhecimentos sobre o funcionamento de descarregadores não convencionais em degraus.

5.2 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Tendo em atenção o acima referido e as dificuldades sentidas ao longo do presente estudo, na análise de resultados, o autor recomenda como desenvolvimentos futuros os seguintes estudos:

- Construção de modelos descarregadores com outras geometrias, nomeadamente alturas de degraus distintas, efectuado posteriormente ao estudo comparativo com o presente estudo;
- Análise da concentração de ar ao longo do canal descarregador e a sua influência no desenvolvimento do escoamento;
- Aprofundar o estudo dos escoamento de transição, tentando encontrar um melhor enquadramento teórico;
- Comparação da dissipação de energia total no descarregador com a obtida através do estudo do ressalto hidráulico que se forma a jusante do descarregador de cheia;

- Comparação com o funcionamento de descarregadores existentes e de características semelhantes, para de avaliação de eventuais efeitos de escala e a influência destes em estudos em modelo.

BIBLIOGRAFIA

- André, M., Ramos, P.(2004). Dissipação de Energia em Descarregadores de Cheia em Degraus. Aplicação a Descarregadores com Largura Constante e com Paredes Convergentes. VII Congresso da Água, 8 a 12 de Março de 2004, LNEC, Associação Portuguesa de Recursos Hídricos, Lisboa
- Barbosa, J.N. (1986). Mecânica dos Fluidos e Hidráulica Geral Volume II. Porto Editora, Porto.
- BOES, R. M. e HAGER, W. H. (2003b) – “Hydraulic Design of Stepped Spillways”, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE 129 (9): 671-679.
- QUINTELA, A. C. (2005). Hidráulica. 9ª edição, Ed. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa (Portugal).
- Custódio, C.(2009). Descarregadores de Blocos de Betão Pré-Fabricados sobre Barragens de Aterro. Dissertação de Mestrado, IST.
- Descarregadores de Blocos de Betão Pré-Fabricados sobre Barragens de Aterro. Dissertação de Mestrado, IST.
- DAI PRÁ, M. (2004) Características de Escoamentos sobre Vertedouros em Degraus de Declividade 1V:1H. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre (Brasil).
- FAEL, C. (2000) – Escoamento em Quedas Sucessivas. Ocorrência e Dissipação de Energia. Dissertação de mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa (Portugal).
- FRIZELL, K. H (2006) – Research State-of-the-Art and Needs for Hydraulic Design of Stepped Spillways. Reclamation Water in the West, Bureau of Reclamation, Water Resources Research Laboratory, Denver, Colorado (EUA).
- Ferreira, R., (2009). Concepção e projecto de um descarregador em degraus escavado em rocha. Dissertação de mestrado, FEUP.
- Figueiredo, N. (2010). Dissipação de energia a jusante de um descarregador não convencional. Dissertação de mestrado, FEUP.
- Pinheiro, A. (2007). Descarregadores de Cheia em Canal de Encosta em Barragens de Aterro. Concepção e Dimensionamento Hidráulico. Lição de Síntese, IST.
- Pinheiro, A. (2006). Descarregadores de cheia em canal de encosta, dimensionamento e implantação. Apontamentos de Estruturas Hidráulicas, Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Pinheiro, A., Relvas, A. Descarregadores de Cheias não Convencionais sobre Barragens de Aterro. Apresentação de Soluções e Estudo Comparativo, <http://www.aprh.pt/congressoagua98/files/com/112.pdf> 12.01.2011
- Pinheiro, A.N., Fael, C.S. (2000). Nappe Flow in stepped channels – occurrence and energy dissipations. In H. E. Minor e W.H. Hanger (ed.) International workshop on Hydraulics of stepped spillways, Zurich, Suíça.
- Proença, M.F., *Aproveitamentos Hidráulicos: Aulas Práticas*. Apontamentos práticos da cadeira de 5º ano da opção de Hidráulica e Recursos Hídricos do curso de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Chanson, H. (1994^a). Comparison of Energy dissipation between Nappe and Skimming Flow Regimes and Stepped Chutes. IAHR, Journal of Hydraulic Research, Vol.32, No. 2, pp 213-218.
- Chanson, H. (1994^b) Hydraulic Design of Stepped Cascades, Channels, Weirs and Spillways. Pergamon, Oxford, UK.

CHANSON, H. (1995). Jet Flow on Stepped Spillways - Discussion. *Jl of Hyd. Engrg.*, ASCE, Vol. 121, No. 5, pp. 441-442 (ISSN 0733-9429).

Chanson, H.(1995). Jet Flow on Stepped Spillways. The University of Queensland, Brisbane.

Chanson, H. (2001). Hydraulic Design of Stepped Spillways and Downstream Energy Dissipators. The University of Queensland, Brisbane.

Chanson, H., Gonzalez, A.,(2005). Physical Modelling and Scale Effects of Air-Water Flows on Stepped Spillways. *Journal of Zhejiang University Science*, 20/01/2005, 243-250, Zhejiang University, Hangzhou.

Chanson, H., Gonzalez, C. (2007). Hydraulic Design of Stepped Spillways and Downstream Energy Dissipators for Embankment Dams. *Dam Engineering*, 01-03-2007, 223-244. Rodriguez, A.A.A.

Chanson, H. and Toombes, L (2002). Experimental Investigations of air Entrainment in transition and Skimming Flows down a Stepped Chute. *Canadian Journal of Civil Engineering*. Vol.29, No.1, pp. 145-156.

Diez-Cascon, J., Blanco, J.L., Revilla, J. and Garcia, R., (1991). Studies od Hydraulic Behavior of Stepped Spillways. *Internacional Water Power and Dam Construction*, Vol. 43, September.

Gonzales, C.A, Chanson, H. (2004). Stepped Spillways for Embankmente Dams. Review, Progress and Developmente in Overflow Hydraulics. *Hydraulics of dams an River Structures*, Yazdandoost and Attari (eds), Taylor and Francis Group, London.

Gonzales, C.A., Chanson, H. (2005) Experimental study of Turbulence Manipulation in Stepped Spillways. Implications on flow resistance in skimming Flows. Proc: 31th IAHR Congress, Seoul, Korea.

Lencastre, A.(2001) Hidráulica de Estruturas – Descarregadores. LNEC.

Meireles, I. (2005) Caracterização do Escoamento Deslizante sobre Turbilhões e Energia Específica Residual em Descarregadores de Cheias em Degraus. Dissertação de mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa (Portugal).

Matos, J. , Quintela, A. (1995). Energy dissipation in skimming flow over stepped spillways. A comparative analysis. Proc. 26th IAHL Congress, Londosn, UK, A. Ervine, (ed.). Thomas Telford, Vol.1, B31, 370-372.

Ohtsu,I., Yasuda, Y, Takahashi,M (2001). Onset of skimming flow on stepped spillways – Discussion. *Journal of Hidraulic Engineering*. V.127, p522-524.

Ohtsu,I., Yasuda, Y, Takahashi,M (1997) Characteristics of flow conditions on stepped channels. In: Biennal Congress, 27, of International Association for Hydraulic Research, San Francisco. IAHR, 1997, p.583-588.

Ohtsu,I., Yasuda, Y, Takahashi,M (2004). Flow characteristics of skimming flows in stepped channels. ASCE, *Journal of Hydraulic Engineering*. V.130, n.9, p.860-869.

Povh, P.H. (2000). Avaliação da energia residual a jusante de vertedouros em degraus com fluxos em regime skimming flow. Dissertação de Mestrado em Engenharia Hidraulica, Departamento de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

Povh, P.H, Tozzi, M.J. (2001). Concentração média de ar do escoamento na base de vertedouros em degraus. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Porto Alegre. ABRH: 2001.18p.

Rice, C.E., and Kadavy, K.C., (1996). Model Study of a Roller Compacted Concret Stepped Spillway. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 122, No.6, June.

Simões, A. (2008). Considerações sobre a hidráulica de vertedores em degraus. Metodologias adimensionais para pré-dimensionamento. Dissertação de Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.

Stephenson, D. (1991). Energy dissipation down stepped spillways. Water Power & Dam construction, v. 43, n.9, p 27-30, Sept. 1991.

Takahashi, M, Yasuda, Y., Ohtsu, I., (2005). Effect of Reynolds Number on characteristics of skimming flows in stepped channels. Proceedings of the 31st IAHR Congress, Vol.1, Seoul Korea, pp. 644-653.

Rajaratnam, N., (1990). Skimming Flow in Stepped Spillways. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol.166, No.4.

http://www.inag.pt/inag2004/port/divulga/legisla/pdf_nac/SegurancaBarragens/Port846_93..

10.11.2010

ANEXO I

RECTAS DE CALIBRAÇÃO DISPOSITIVO CORPO FLUTUADOR LIGADO A POTENCIÓMETRO

A2. RECTAS DE CALIBRAÇÃO DO DISPOSITIVO FLUTUADOR/POTENCIÓMETRO RELATIVO AO DEGRAU 3

Quadro I.1. Variáveis características do Degrau 3

Gama de Caudais	L Comprimento da vareta [mm]	B Altura degrau centro de rotação [mm]	D Diâmetro Flutuador [mm]
Caudais mais baixos	239.75	184	20.5
Caudais mais altos		191	

Quadro I.2. Dados relativos à calibração do dispositivo flutuador/potenciómetro para série de caudais mais baixos.

Degrau 3			
e Espessura das placas [mm]	Sinal [n=500]	A Atura degrau centro de rotação [mm]	α [Rad]
0,0	2,559	173,75	0,760
12,0	2,767	161,75	0,830
24,5	3,010	149,25	0,899
26,0	3,016	147,75	0,907
39,0	3,226	134,75	0,974

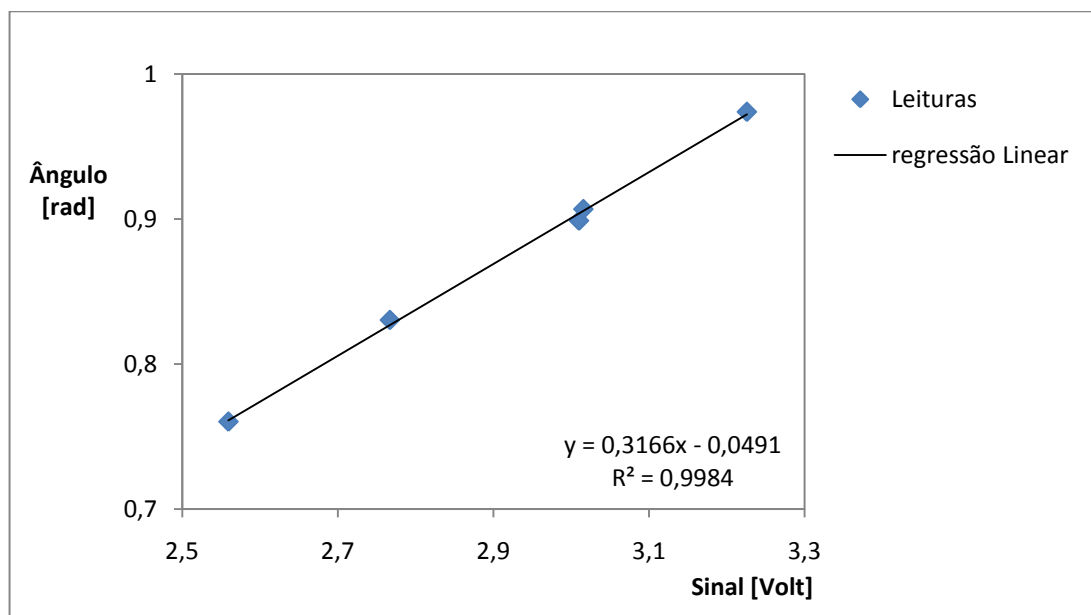


Figura I.1. Lei de calibração do dispositivo Flutuador/Potenciómetro, para gama de caudais mais baixa, relativa ao Degrau 3

Quadro I.3. Dados relativos à calibração do dispositivo flutuador/potenciómetro para série de caudais mais altos.

Degrau 3			
e Espessura das placas [mm]	Sinal [n=500]	A Atura degrau centro de rotação [mm]	α [Rad]
0,0	2,451	180,75	0,717
12,0	2,693	168,75	0,790
24,5	2,916	156,25	0,861
26,0	2,917	154,75	0,869
39,0	3,151	141,75	0,938

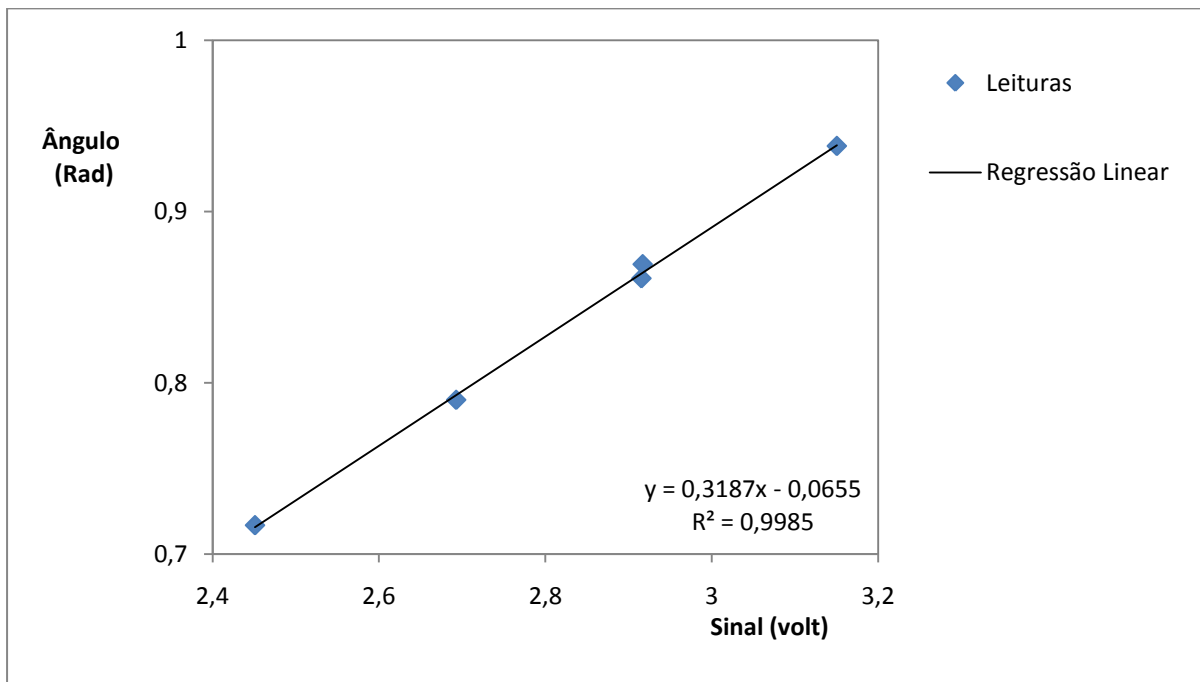


Figura I.2. Lei de calibração do dispositivo Flutuador/Potenciómetro, para gama de caudais mais alta, relativa ao Degrau 3

A3. RECTAS DE CALIBRAÇÃO DO DISPOSITIVO FLUTUADOR/POTENCIÓMETRO RELATIVO AO DEGRAU 4

Quadro I.4. Variáveis características do Degrau 4

Gama de Caudais	L Comprimento da vareta [mm]	B Altura degrau centro de rotação [mm]	D Diâmetro Flutuador [mm]
Caudais mais baixos	239.75	187	20.5
Caudais mais altos		191	

Quadro I.5 Dados relativos à calibração do dispositivo flutuador/potenciómetro para série de caudais mais baixos.

Degrau 4			
e Espessura das placas [mm]	Sinal [n=500]	A Atura degrau centro de rotação [mm]	α [Rad]
0,0	2,525	176,75	0,742
12,0	2,727	164,75	0,813
24,5	2,963	152,25	0,883
26,0	2,982	150,75	0,891
39,0	3,197	137,75	0,959

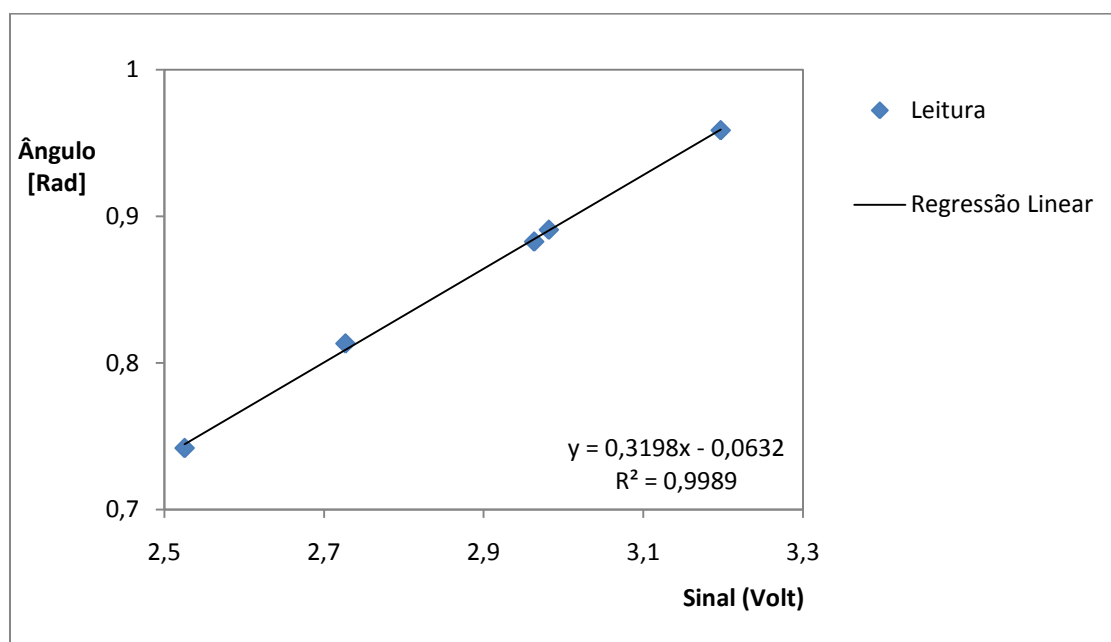


Figura I.3. Lei de calibração do dispositivo Flutuador/Potenciómetro, para gama de caudais mais baixa, relativa ao Degrau 4

Quadro I.6. Dados relativos à calibração do dispositivo flutuador/potenciómetro para série de caudais mais altos.

Degrau 4			
e	Sinal	A	α
Espessura das placas [mm]	[n=500]	Atura degrau centro de rotação [mm]	[Rad]
0,0	2,451	180,75	0,717
12,0	2,663	168,75	0,790
24,5	2,933	156,25	0,861
26,0	2,928	154,75	0,869
39,0	3,178	141,75	0,938

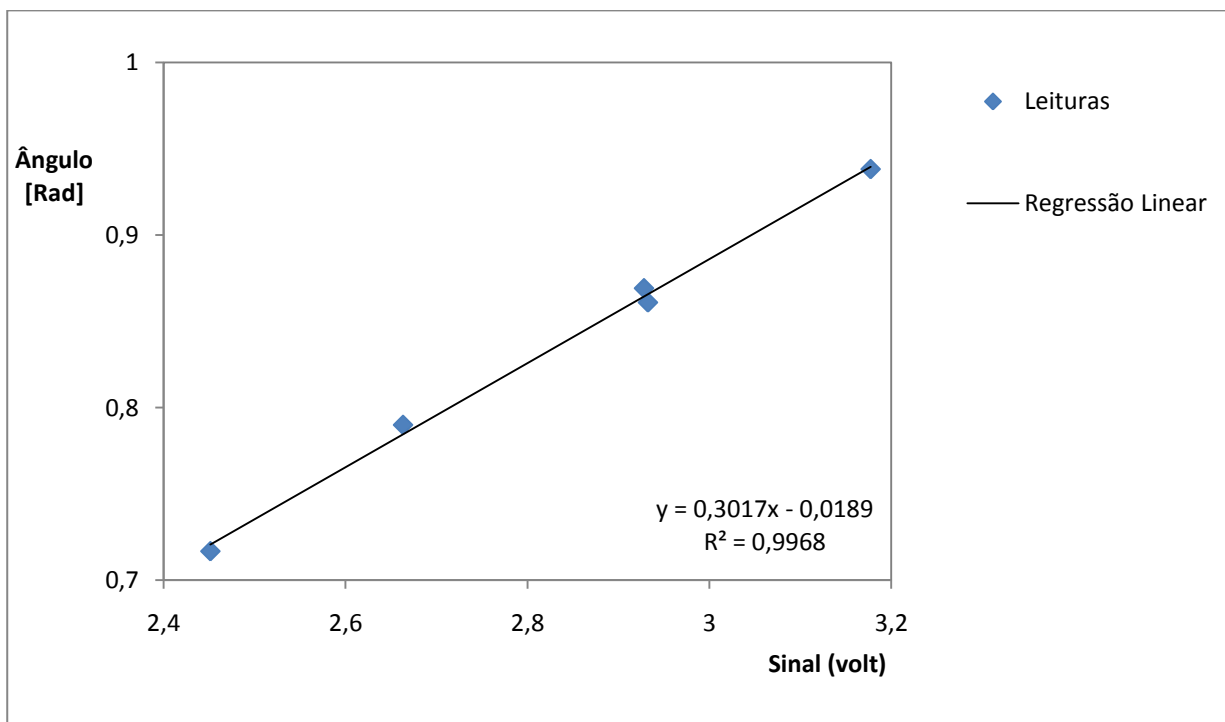


Figura I.4. Lei de calibração do dispositivo Flutuador/Potenciómetro, para gama de caudais mais alta, relativa ao Degrau 4

A4. RECTAS DE CALIBRAÇÃO DO DISPOSITIVO FLUTUADOR/POTENCIÓMETRO RELATIVO AO DEGRAU 5

Quadro I.7. Variáveis características do Degrau 5

Gama de Caudais	L Comprimento da vareta [mm]	B Altura degrau centro de rotação [mm]	D Diâmetro Flutuador [mm]
Caudais mais baixos	239.75	188	20.5
Caudais mais altos		192	

Quadro I.8 Dados relativos à calibração do dispositivo flutuador/potenciómetro para série de caudais mais baixos.

Degrau 5			
e Espessura das placas [mm]	Sinal [n=500]	A Atura degrau centro de rotação [mm]	α [Rad]
0,0	2,509	177,75	0,736
12,0	2,719	165,75	0,807
24,5	2,942	153,25	0,877
26,0	2,969	151,75	0,885
39,0	3,187	138,75	0,954

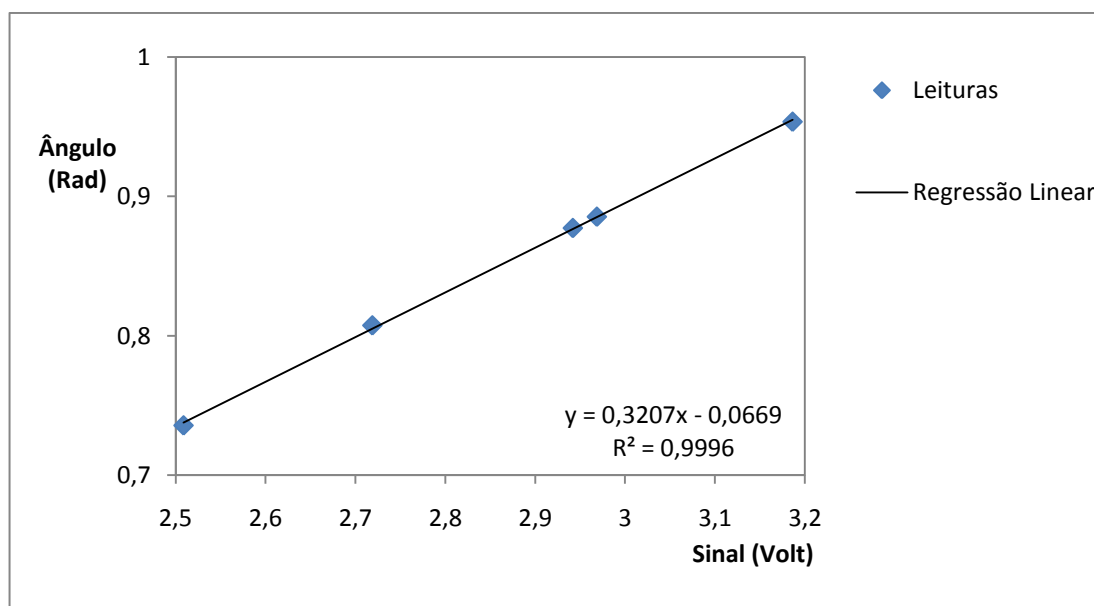


Figura I.5. Lei de calibração do dispositivo Flutuador/Potenciómetro, para gama de caudais mais baixa, relativa ao Degrau 5

Quadro I.9 Dados relativos à calibração do dispositivo flutuador/potenciómetro para série de caudais mais altos

Degrau 5			
e	Sinal	A	α
Espessura das placas [mm]	[n=500]	Atura degrau centro de rotação [mm]	[Rad]
0,0	2,438	181,75	0,710
12,0	2,663	169,75	0,784
24,5	2,888	157,25	0,855
26,0	2,924	155,75	0,864
39,0	3,126	142,75	0,933

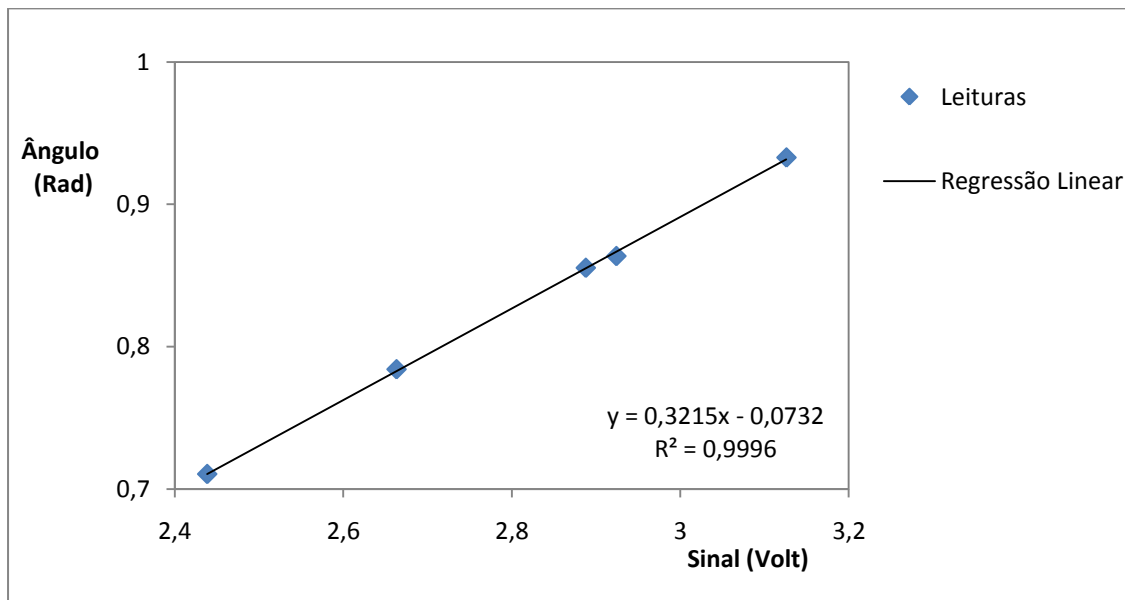


Figura I.6. Lei de calibração do dispositivo Flutuador/Potenciómetro, para gama de caudais mais alta, relativa ao Degrau 5

A5. RECTAS DE CALIBRAÇÃO DO DISPOSITIVO FLUTUADOR/POTENCIÓMETRO RELATIVO AO DEGRAU 6

Quadro I.10. Variáveis características do Degrau 6

Gama de Caudais	L Comprimento da vareta [mm]	B Altura degrau centro de rotação [mm]	D Diâmetro Flutuador [mm]
Caudais mais baixos	239.75	189	20.5
Caudais mais altos		192	

Quadro I.11 Dados relativos à calibração do dispositivo flutuador/potenciómetro para série de caudais mais baixos.

Degrau 6			
e Espessura das placas [mm]	Sinal [n=500]	A Atura degrau centro de rotação [mm]	α [Rad]
0,0	2,459	178,75	0,729
12,0	2,679	166,75	0,802
24,5	2,961	154,25	0,872
26,0	2,984	152,75	0,880
39,0	3,196	139,75	0,949

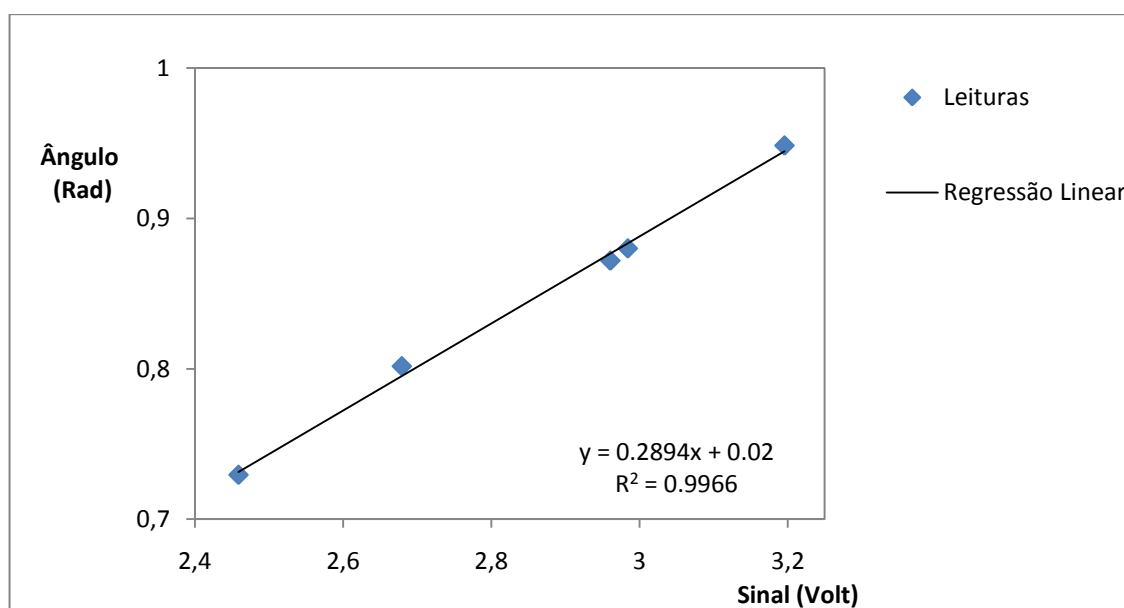


Figura I.7. Lei de calibração do dispositivo Flutuador/Potenciómetro, para gama de caudais mais baixa, relativa ao Degrau 6

Quadro I.12 Dados relativos à calibração do dispositivo flutuador potenciômetro para série de caudais mais altos

Degrau 6			
e Espessura das placas [mm]	Sinal [n=500]	A Atura degrau centro de rotação [mm]	α [Rad]
0,0	2,433	181,75	0,7104
12,0	2,641	169,75	0,7841
24,5	2,871	157,25	0,8554
26,0	2,898	155,75	0,8637
39,0	3,119	142,75	0,9330

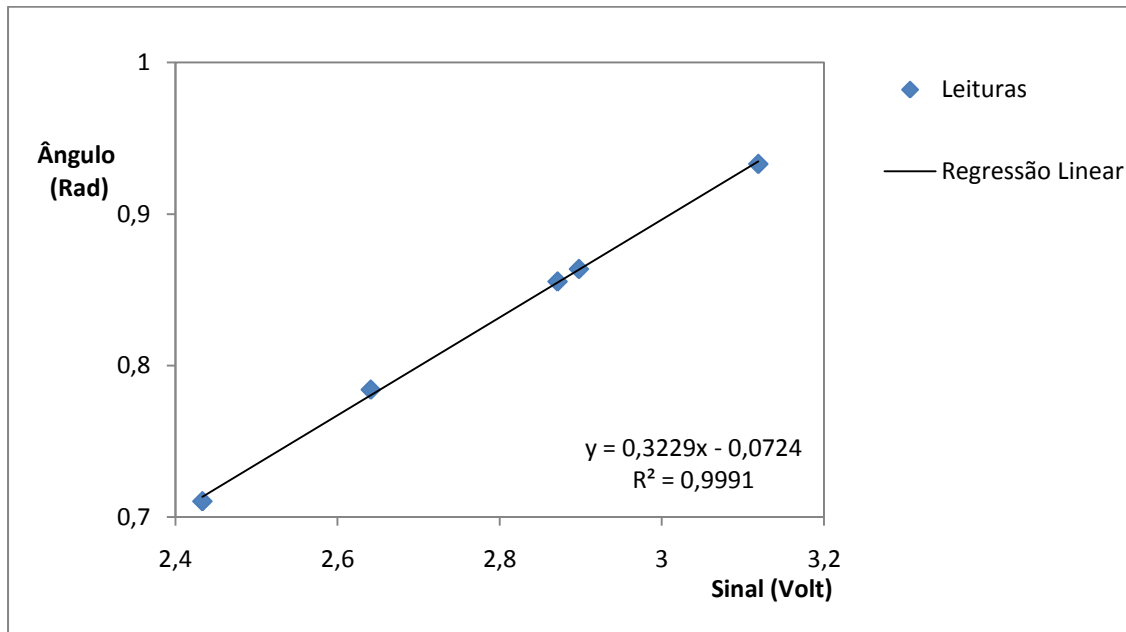


Figura I.8. Lei de calibração do dispositivo Flutuador/Potenciômetro, para gama de caudais mais alta, relativa ao Degrau 6

A6. RECTAS DE CALIBRAÇÃO DO DISPOSITIVO FLUTUADOR/POTENCIÓMETRO RELATIVO AO DEGRAU 7

Quadro I.13. Variáveis características do Degrau 7

Gama de Caudais	L Comprimento da vareta [mm]	B Altura degrau centro de rotação [mm]	D Diâmetro Flutuador [mm]
Caudais mais baixos	239.75	186	20.5
Caudais mais altos		191	

Quadro I.14 Dados relativos à calibração do dispositivo flutuador potenciómetro para série de caudais mais baixos.

Degrau 7			
e Espessura das placas [mm]	Sinal [n=500]	A Atura degrau centro de rotação [mm]	α [Rad]
0,0	2,493	175,75	0,748
12,0	2,696	163,75	0,819
24,5	2,946	151,25	0,888
26,0	2,942	149,75	0,896
39,0	3,174	136,75	0,964

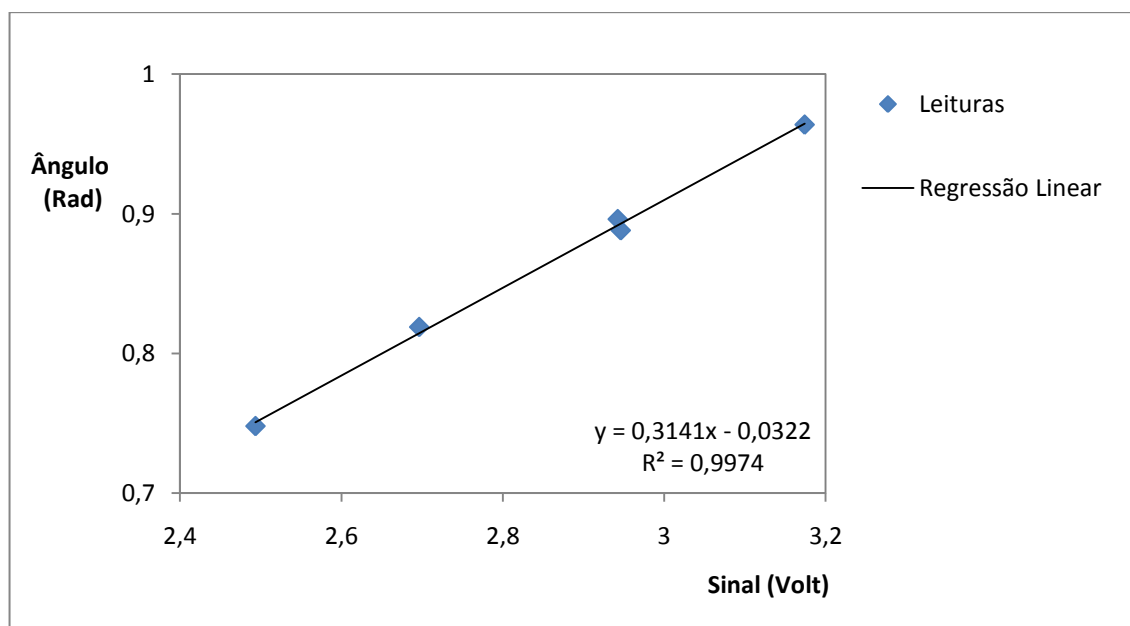


Figura I.9. Lei de calibração do dispositivo Flutuador/Potenciómetro, para gama de caudais mais baixa, relativa ao Degrau 7

Quadro I.15 Dados relativos à calibração do dispositivo flutuador potenciômetro para série de caudais mais altos

Degrau 7			
e	Sinal	A	α
Espessura das placas [mm]	[n=500]	Atura degrau centro de rotação [mm]	[Rad]
0,0	2,425	180,75	0,717
12,0	2,652	168,75	0,790
24,5	2,900	156,25	0,861
26,0	2,916	154,75	0,869
39,0	3,126	141,75	0,938

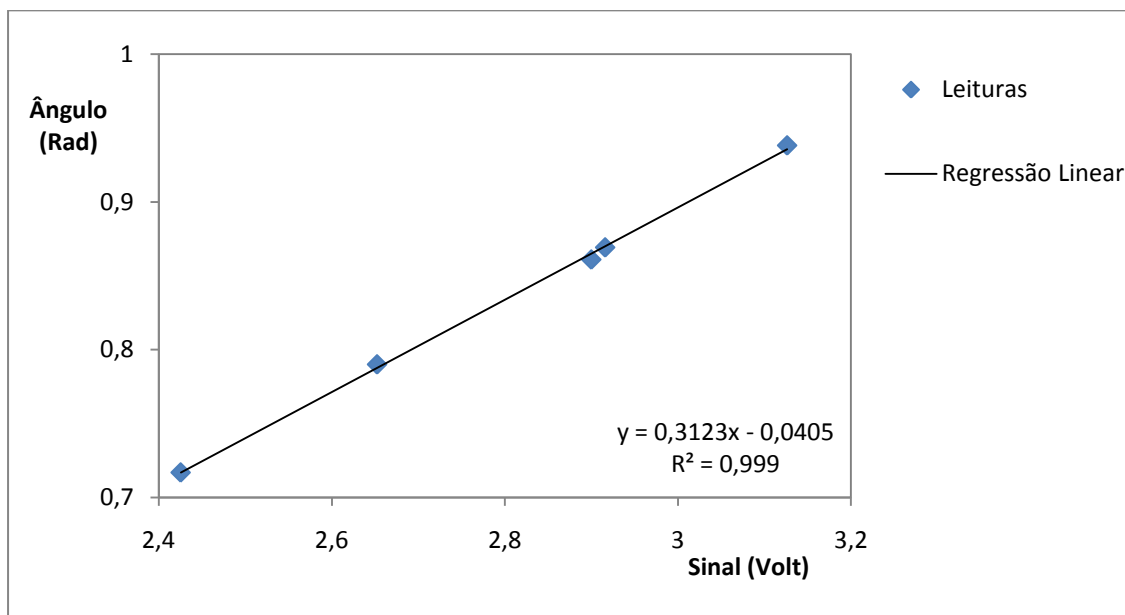


Figura I.10. Lei de calibração do dispositivo Flutuador/Potenciômetro, para gama de caudais mais alta, relativa ao Degrau 7

A7. RECTAS DE CALIBRAÇÃO DO DISPOSITIVO FLUTUADOR/POTENCIÓMETRO RELATIVO AO DEGRAU 8

Quadro I.16. . Variáveis características do Degrau 8

Gama de Caudais	L Comprimento da vareta [mm]	B Altura degrau centro de rotação [mm]	D Diâmetro Flutuador [mm]
Caudais mais baixos	239.75	185	20.5
Caudais mais altos		193	

Quadro I.17 Dados relativos à calibração do dispositivo flutuador potenciómetro para série de caudais mais baixos.

Degrau 8			
e Espessura das placas [mm]	Sinal [n=500]	A Atura degrau centro de rotação [mm]	α [Rad]
0,0	2,505	174,75	0,754
12,0	2,713	162,75	0,825
24,5	2,923	150,25	0,893
26,0	2,947	148,75	0,901
39,0	3,196	135,75	0,969

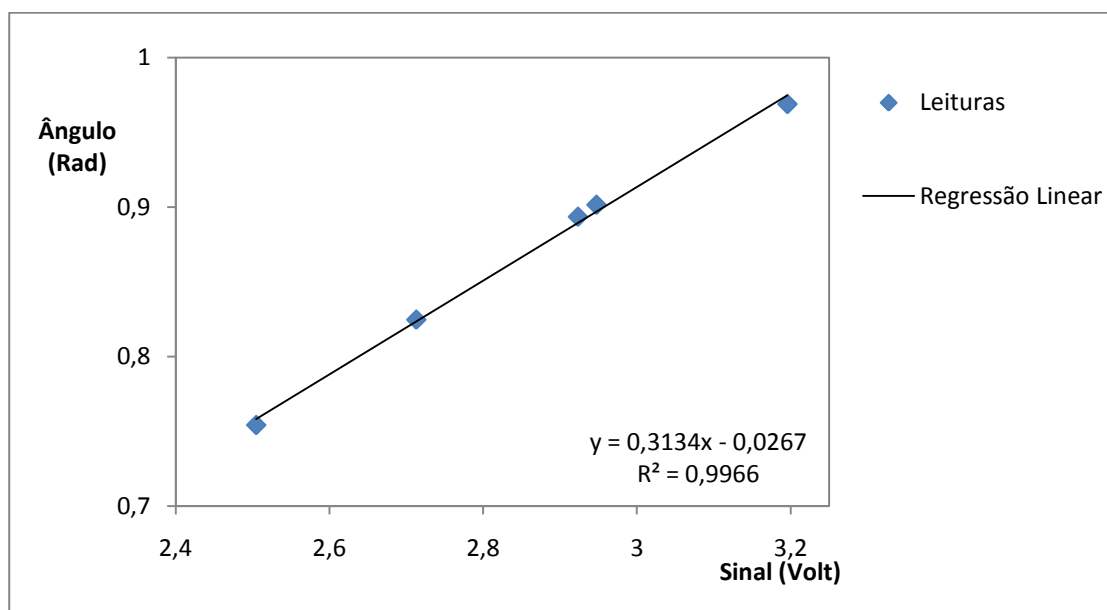


Figura I.11. Lei de calibração do dispositivo Flutuador/Potenciómetro, para gama de caudais mais baixa, relativa ao Degrau 8

Quadro I.18 Dados relativos à calibração do dispositivo flutuador potenciômetro para série de caudais mais altos

Degrau 8			
e	Sinal	A	α
Espessura das placas [mm]	[n=500]	Atura degrau centro de rotação [mm]	[Rad]
0,0	2,469	182,75	0,704
12,0	2,697	170,75	0,778
24,5	2,947	158,25	0,850
26,0	2,957	156,75	0,858
39,0	3,169	143,75	0,928

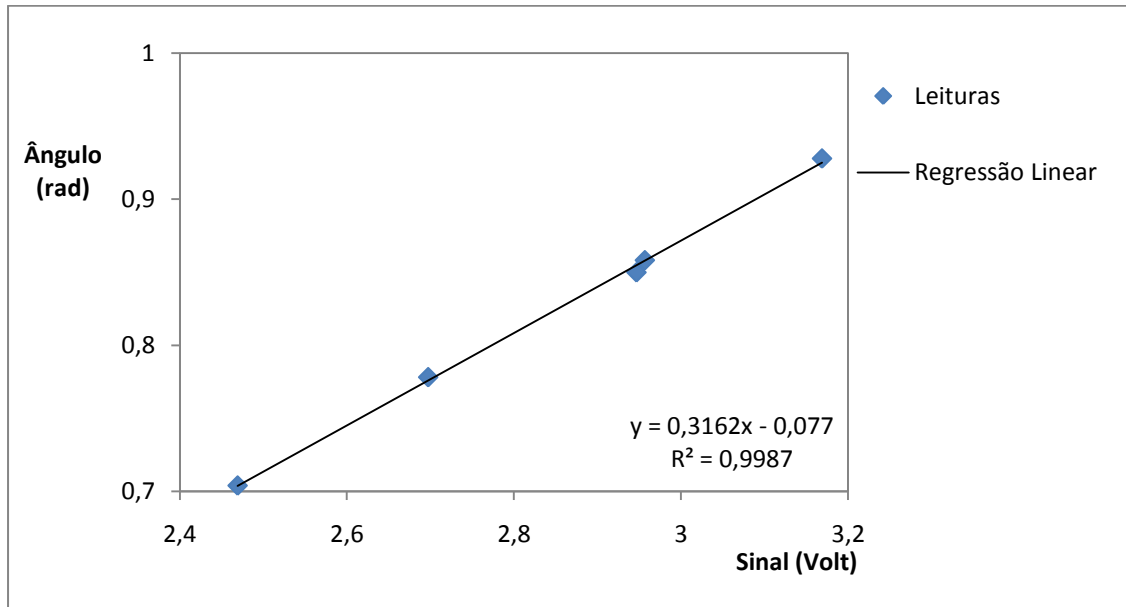


Figura I.12. Lei de calibração do dispositivo Flutuador/Potenciômetro, para gama de caudais mais alta, relativa ao Degrau 8

A8. RECTAS DE CALIBRAÇÃO DO DISPOSITIVO FLUTUADOR/POTENCIÓMETRO RELATIVO AO DEGRAU 9

Quadro I.19. Variáveis características do Degrau 9

Gama de Caudais	L Comprimento da vareta [mm]	B Altura degrau centro de rotação [mm]	D Diâmetro Flutuador [mm]
Caudais mais baixos	239.75	187	20.5
Caudais mais altos		192	

Quadro I.20 Dados relativos à calibração do dispositivo flutuador potenciómetro para série de caudais mais baixos.

Degrau 9			
e Espessura das placas [mm]	Sinal [n=500]	A Atura degrau centro de rotação [mm]	α [Rad]
0,0	2,505	176,75	0,742
12,0	2,705	164,75	0,813
24,5	2,969	152,25	0,883
26,0	2,982	150,75	0,891
39,0	3,197	137,75	0,959

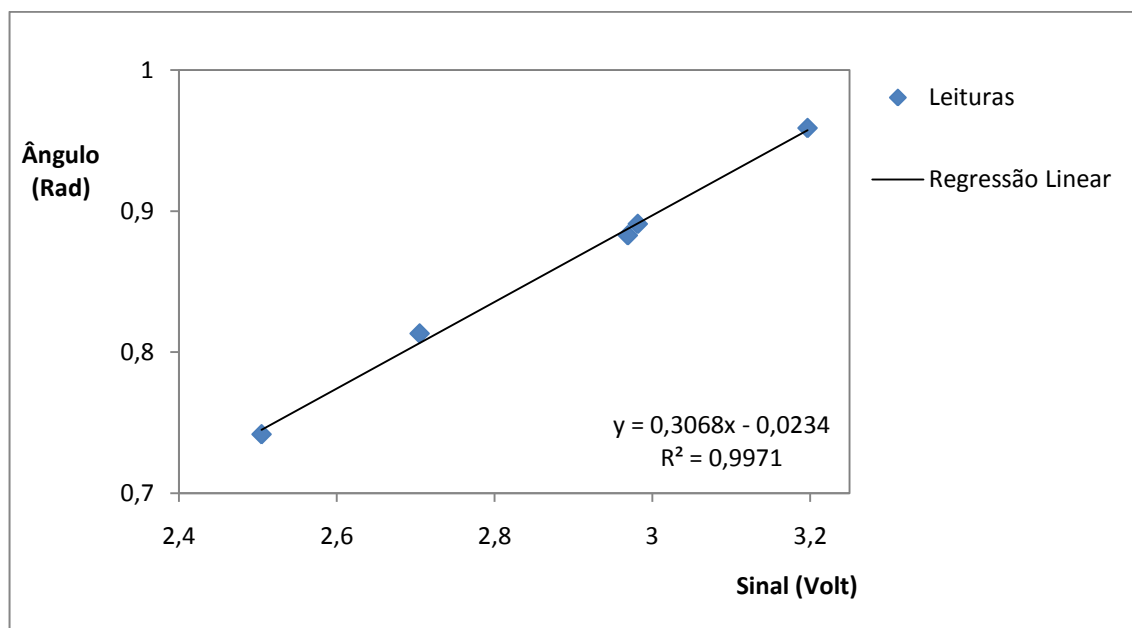


Figura I.13. . Lei de calibração do dispositivo Flutuador/Potenciómetro, para gama de caudais mais baixa, relativa ao Degrau 9

Quadro I.21 Dados relativos à calibração do dispositivo flutuador potenciômetro para série de caudais mais altos

Degrau 9			
e Espessura das placas [mm]	Sinal [n=500]	A Atura degrau centro de rotação [mm]	α [Rad]
0,0	2,431	181,75	0,710
12,0	2,618	169,75	0,784
24,5	2,882	157,25	0,855
26,0	2,913	155,75	0,864
39,0	3,122	142,75	0,933

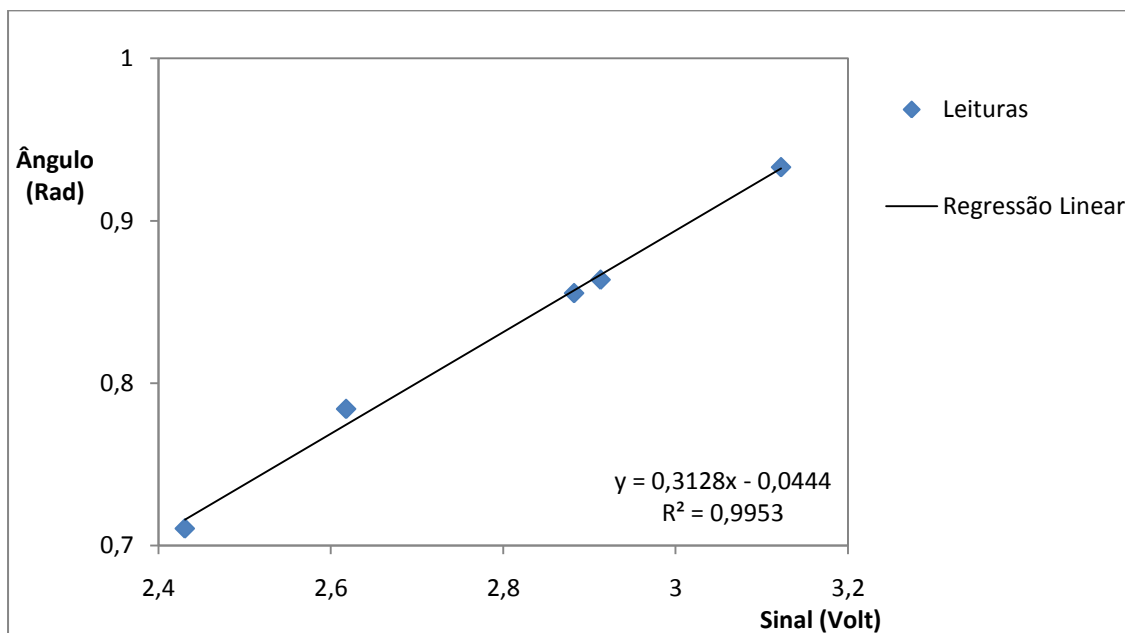


Figura I.14. Lei de calibração do dispositivo Flutuador/Potenciômetro, para gama de caudais mais alta, relativa ao Degrau 9

A9. RECTAS DE CALIBRAÇÃO DO DISPOSITIVO FLUTUADOR/POTENCIÓMETRO RELATIVO AO DEGRAU 10

Quadro I.22. Variáveis características do Degrau 10

Gama de Caudais	L Comprimento da vareta [mm]	B Altura degrau centro de rotação [mm]	D Diâmetro Flutuador [mm]
Caudais mais baixos	239.75	186	20.5
Caudais mais altos		191	

Quadro I.23 Dados relativos à calibração do dispositivo flutuador potenciómetro para série de caudais mais baixos.

Degrau 10			
e Espessura das placas [mm]	Sinal [n=500]	A Atura degrau centro de rotação [mm]	α [Rad]
0,0	2,471	175,75	0,748
12,0	2,701	163,75	0,819
24,5	2,924	151,25	0,888
26,0	2,923	149,75	0,896
39,0	3,167	136,75	0,964

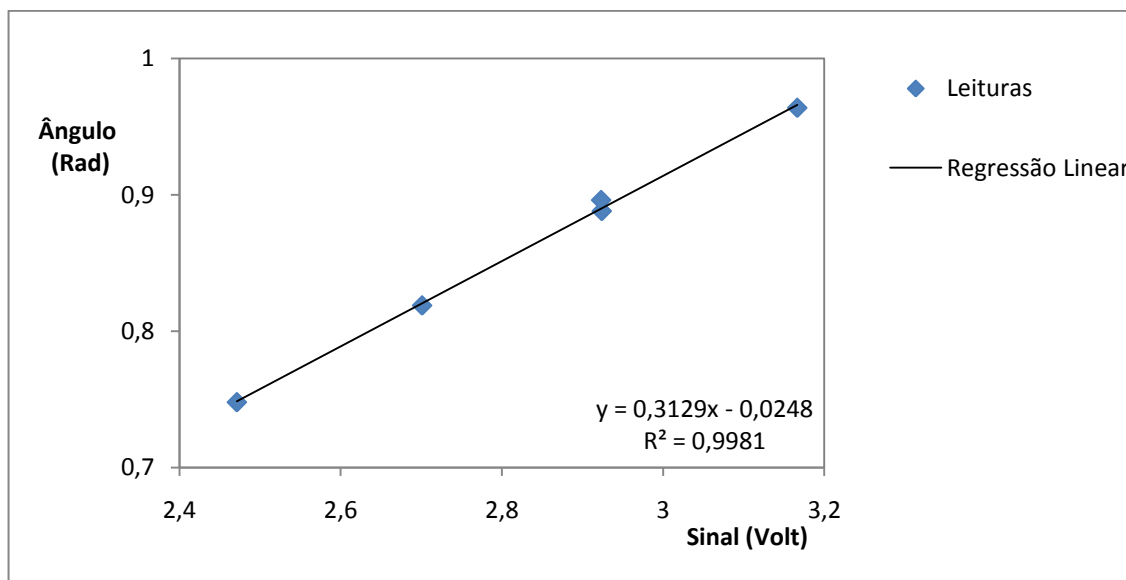


Figura I.15. Lei de calibração do dispositivo Flutuador/Potenciómetro, para gama de caudais mais baixa, relativa ao Degrau 10

Quadro I.24 Dados relativos à calibração do dispositivo flutuador potenciômetro para série de caudais mais altos

Degrau 10			
e	Sinal	A	α
Espessura das placas [mm]	[n=500]	Atura degrau centro de rotação [mm]	[Rad]
0,0	2,432	180,75	0,717
12,0	2,642	168,75	0,790
24,5	2,875	156,25	0,861
26,0	2,906	154,75	0,869
39,0	3,137	141,75	0,938

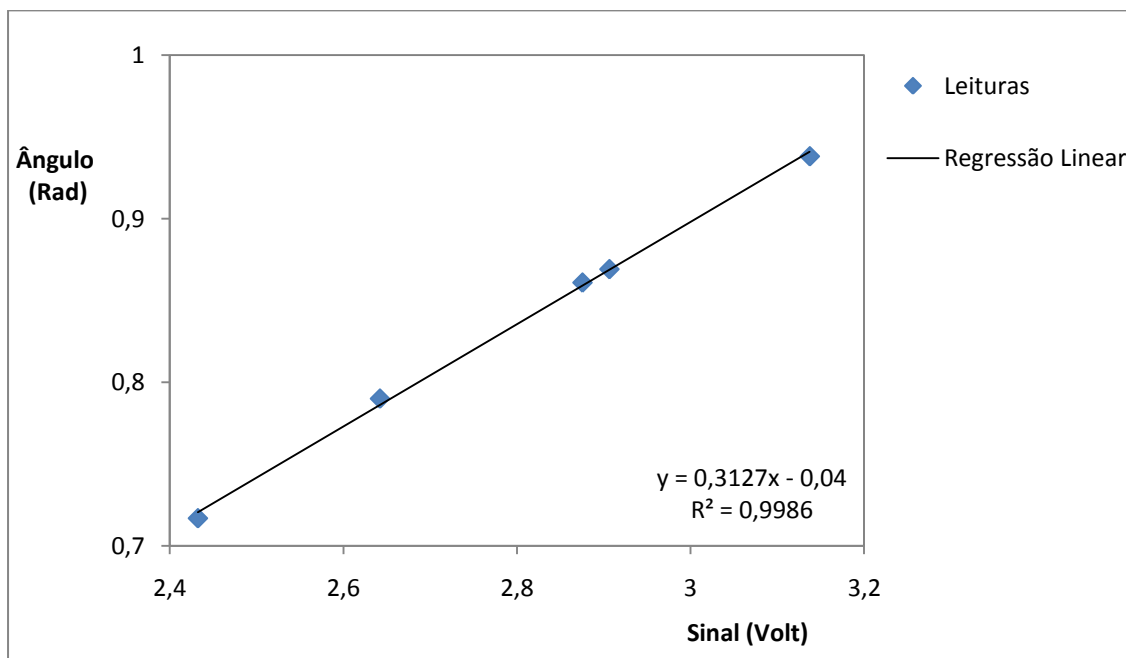


Figura I.16. Lei de calibração do dispositivo Flutuador/Potenciômetro, para gama de caudais mais alta, relativa ao Degrau 10

A10. RECTAS DE CALIBRAÇÃO DO DISPOSITIVO FLUTUADOR/POTENCIÓMETRO RELATIVO AO DEGRAU 11

Quadro I.25. Variáveis características do Degrau 11

Gama de Caudais	L Comprimento da vareta [mm]	B Altura degrau centro de rotação [mm]	D Diâmetro Flutuador [mm]
Caudais mais baixos	239.75	18	20.5
Caudais mais altos		192	

Quadro I.26 Dados relativos à calibração do dispositivo flutuador potenciómetro para série de caudais mais baixos.

Degrau 11			
e Espessura das placas [mm]	Sinal [n=500]	A Atura degrau centro de rotação [mm]	α [Rad]
0,0	2,457	176,75	0,742
12,0	2,679	164,75	0,813
24,5	2,933	152,25	0,883
26,0	2,931	150,75	0,891
39,0	3,162	137,75	0,959

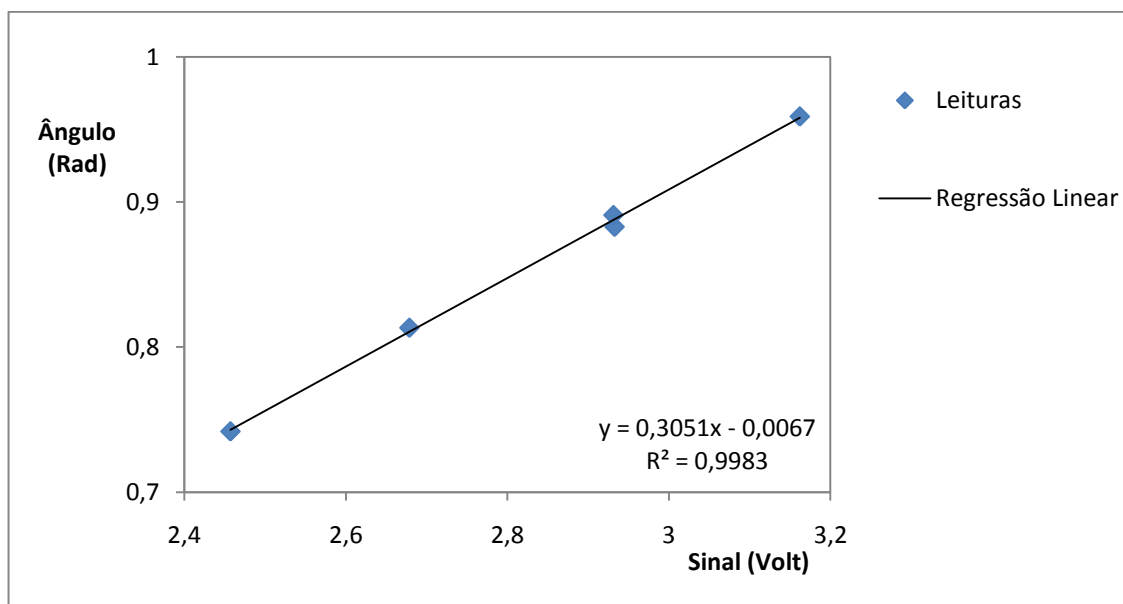


Figura I.17. Lei de calibração do dispositivo Flutuador/Potenciómetro, para gama de caudais mais baixa, relativa ao Degrau 11

Quadro I.27 Dados relativos à calibração do dispositivo flutuador potenciômetro para série de caudais mais altos

Degrau 11			
e	Sinal	A	α
Espessura das placas [mm]	[n=500]	Atura degrau centro de rotação [mm]	[Rad]
0,0	2,414	181,75	0,710
12,0	2,643	169,75	0,784
24,5	2,815	157,25	0,855
26,0	2,893	155,75	0,864
39,0	3,109	142,75	0,933

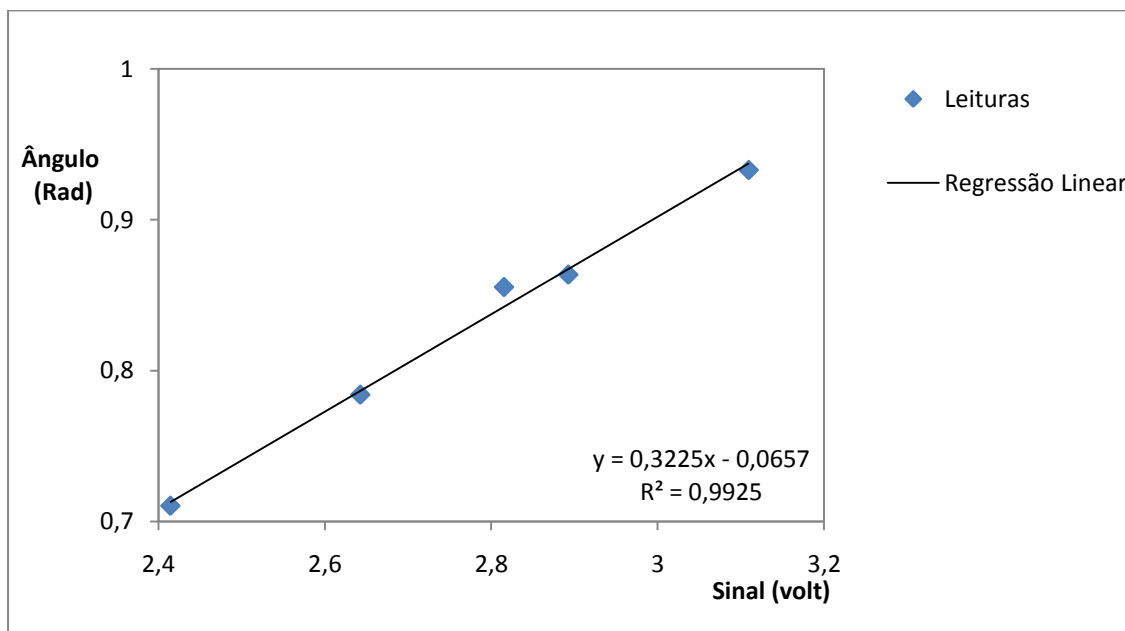


Figura I.18. Lei de calibração do dispositivo Flutuador/Potenciômetro, para gama de caudais mais alta, relativa ao Degrau 11

A11. RECTAS DE CALIBRAÇÃO DO DISPOSITIVO FLUTUADOR/POTENCIÓMETRO RELATIVO AO DEGRAU 12

Quadro I.28. Variáveis características do Degrau 12

Gama de Caudais	L Comprimento da vareta [mm]	B Altura degrau centro de rotação [mm]	D Diâmetro Flutuador [mm]
Caudais mais baixos	239.75	187	20.5
Caudais mais altos		192	

Quadro I.29 Dados relativos à calibração do dispositivo flutuador potenciómetro para série de caudais mais baixos.

Degrau 12			
e Espessura das placas [mm]	Sinal [n=500]	A Atura degrau centro de rotação [mm]	α [Rad]
0,0	2,425	176,75	0,742
12,0	2,661	164,75	0,813
24,5	2,897	152,25	0,883
26,0	2,911	150,75	0,891
39,0	3,148	137,75	0,959

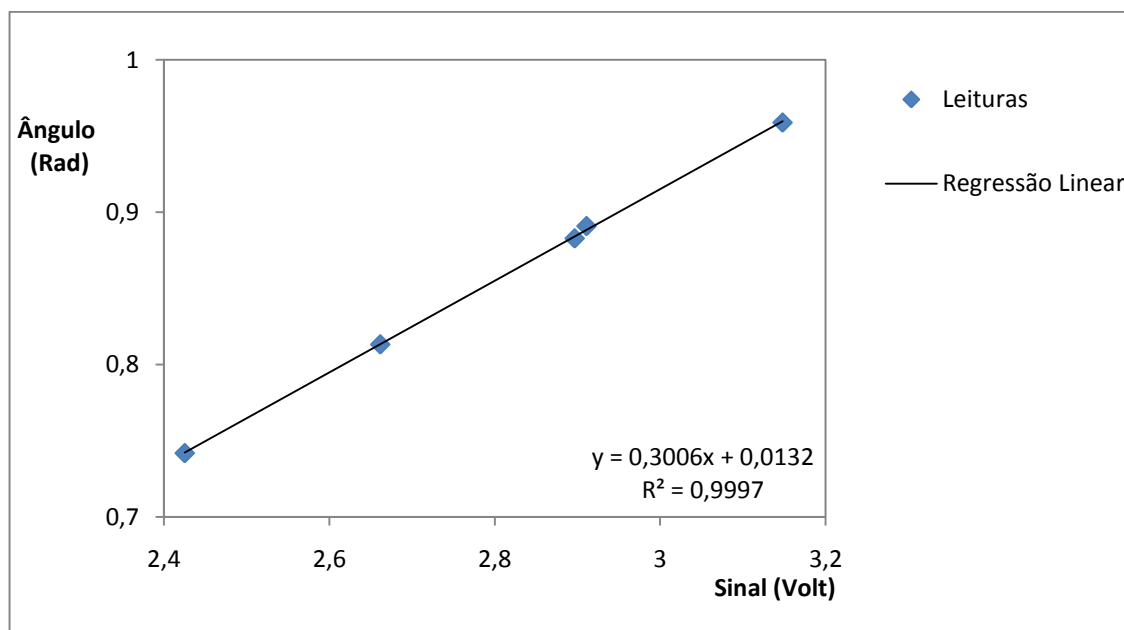


Figura I.19. Lei de calibração do dispositivo Flutuador/Potenciómetro, para gama de caudais mais baixa, relativa ao Degrau 12

Quadro I.30 Dados relativos à calibração do dispositivo flutuador potenciômetro para série de caudais mais altos

Degrau 12			
e Espessura das placas [mm]	Sinal [n=500]	A Atura degrau centro de rotação [mm]	α [Rad]
0,0	2,299	181,75	0,710
12,0	2,562	169,75	0,784
24,5	2,807	157,25	0,855
26,0	2,817	155,75	0,864
32,5	2,927	149,25	0,899
39,0	3,007	142,75	0,933

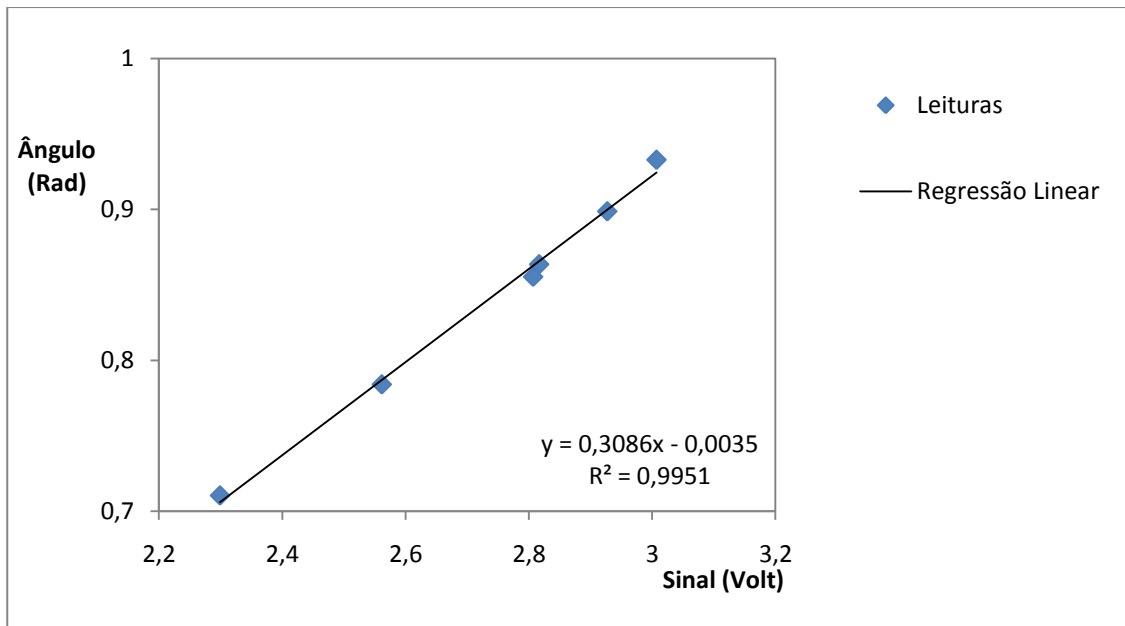


Figura I.20. Lei de calibração do dispositivo Flutuador/Potenciômetro, para gama de caudais mais alta, relativa ao Degrau 12

A12. RECTAS DE CALIBRAÇÃO DO DISPOSITIVO FLUTUADOR/POTENCIÓMETRO RELATIVO AO DEGRAU 13

Quadro I.31. Variáveis características do Degrau 13

Gama de Caudais	L Comprimento da vareta [mm]	B Altura degrau centro de rotação [mm]	D Diâmetro Flutuador [mm]
Caudais mais baixos	239.75	188	20.5
Caudais mais altos		192	

Quadro I.32 Dados relativos à calibração do dispositivo flutuador potenciómetro para série de caudais mais baixos.

Degrau 13			
e Espessura das placas [mm]	Sinal [n=500]	A Atura degrau centro de rotação [mm]	α [Rad]
0,0	2,423	177,75	0,736
12,0	2,635	165,75	0,807
24,5	2,852	153,25	0,877
26,0	2,859	151,75	0,885
39,0	3,088	138,75	0,954

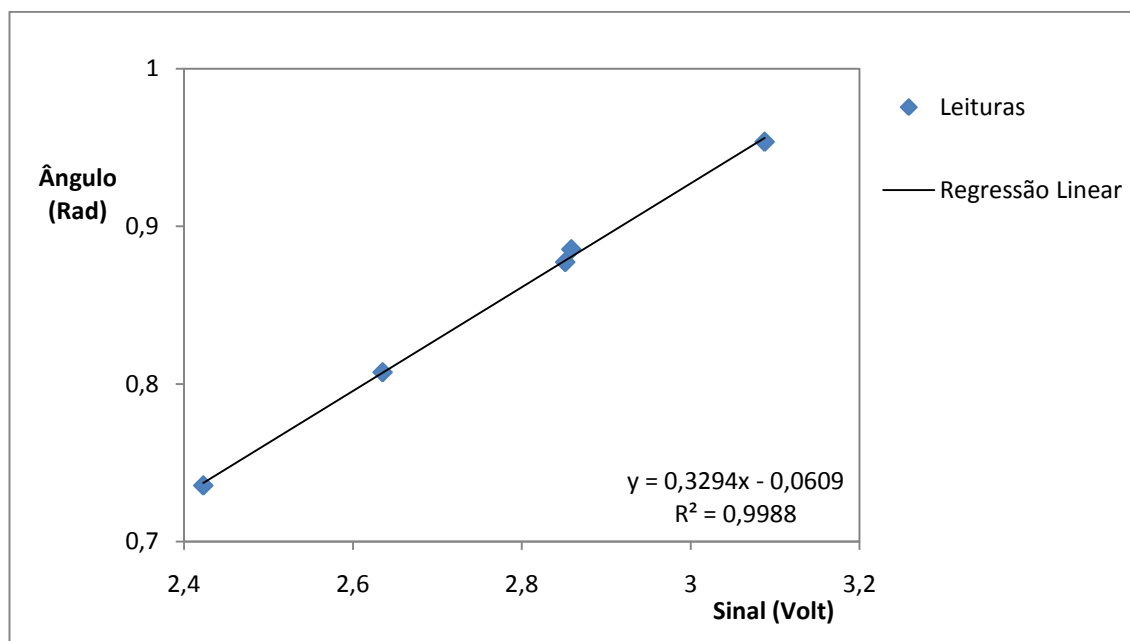


Figura I.21. Lei de calibração do dispositivo Flutuador/Potenciómetro, para gama de caudais mais baixa, relativa ao Degrau 13

Quadro I.33 Dados relativos à calibração do dispositivo flutuador potenciômetro para série de caudais mais altos

Degrau 13			
e	Sinal	A	α
Espessura das placas [mm]	[n=500]	Atura degrau centro de rotação [mm]	[Rad]
0,0	2,352	181,75	0,710
12,0	2,601	169,75	0,784
24,5	2,781	157,25	0,855
26,0	2,848	155,75	0,864
39,0	3,088	142,75	0,933

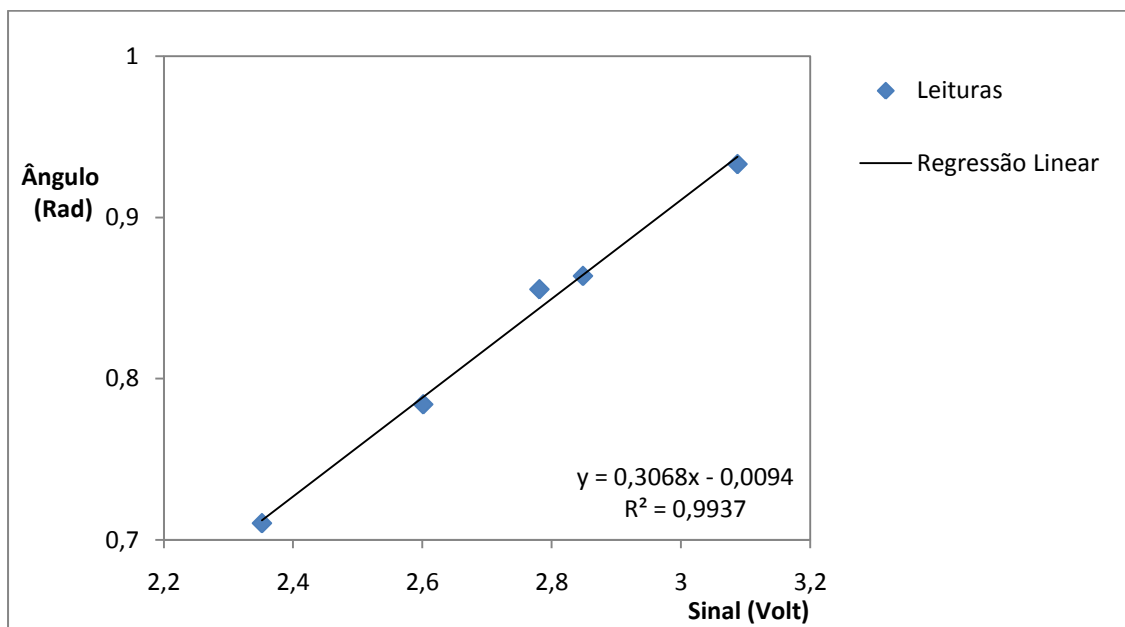


Figura I.22. Lei de calibração do dispositivo Flutuador/Potenciômetro, para gama de caudais mais alta, relativa ao Degrau 13

A13. RECTAS DE CALIBRAÇÃO DO DISPOSITIVO FLUTUADOR/POTENCIÓMETRO RELATIVO AO DEGRAU 14

Quadro I.34. Variáveis características do Degrau 14

Gama de Caudais	L Comprimento da vareta [mm]	B Altura degrau centro de rotação [mm]	D Diâmetro Flutuador [mm]
Caudais mais baixos	239.75	190	20.5
Caudais mais altos		194	

Quadro I.35 Dados relativos à calibração do dispositivo flutuador potenciómetro para série de caudais mais baixos.

Degrau 14			
e Espessura das placas [mm]	Sinal [n=500]	A Atura degrau centro de rotação [mm]	α [Rad]
0,0	2,389	179,75	0,723
12,0	2,647	167,75	0,796
24,5	2,860	155,25	0,866
26,0	2,858	153,75	0,875
39,0	3,097	140,75	0,943

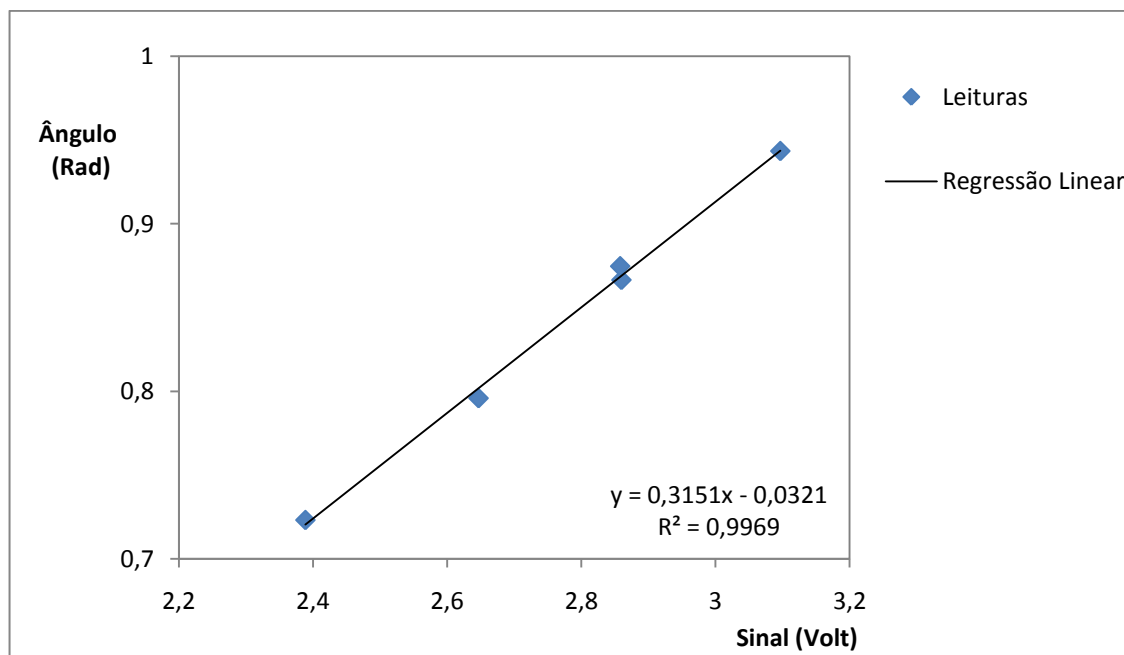


Figura I.23. Lei de calibração do dispositivo Flutuador/Potenciómetro, para gama de caudais mais baixa, relativa ao Degrau 14

Quadro I.36 Dados relativos à calibração do dispositivo flutuador potenciômetro para série de caudais mais altos

Degrau 14			
e	Sinal	A	α
Espessura das placas [mm]	[n=500]	Atura degrau centro de rotação [mm]	[Rad]
0,0	2,301	183,75	0,698
12,0	2,581	171,75	0,772
24,5	2,804	159,25	0,844
26,0	2,808	157,75	0,853
39,0	3,030	144,75	0,923

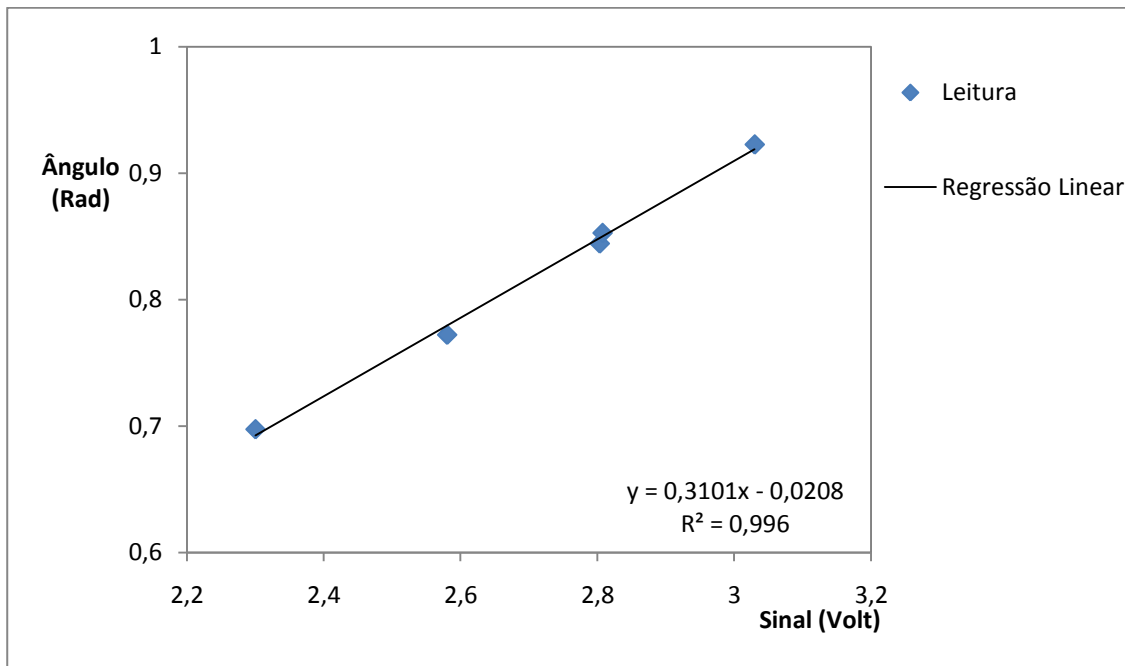


Figura I.24. Lei de calibração do dispositivo Flutuador/Potenciômetro, para gama de caudais mais alta, relativa ao Degrau 14

A14. RECTAS DE CALIBRAÇÃO DO DISPOSITIVO FLUTUADOR/POTENCIÓMETRO RELATIVO AO DEGRAU 16

Quadro I.37. Variáveis características do Degrau 16

Gama de Caudais	L Comprimento da vareta [mm]	B Altura degrau centro de rotação [mm]	D Diâmetro Flutuador [mm]
Caudais mais baixos	239.75	188	20.5
Caudais mais altos		192	

Quadro I.38 Dados relativos à calibração do dispositivo flutuador potenciómetro para série de caudais mais baixos.

Degrau 16			
e Espessura das placas [mm]	Sinal [n=500]	A Atura degrau centro de rotação [mm]	α [Rad]
0,0	2,523	177,75	0,736
12,0	2,796	165,75	0,807
24,5	3,031	153,25	0,877
26,0	3,019	151,75	0,885
39,0	3,240	138,75	0,954

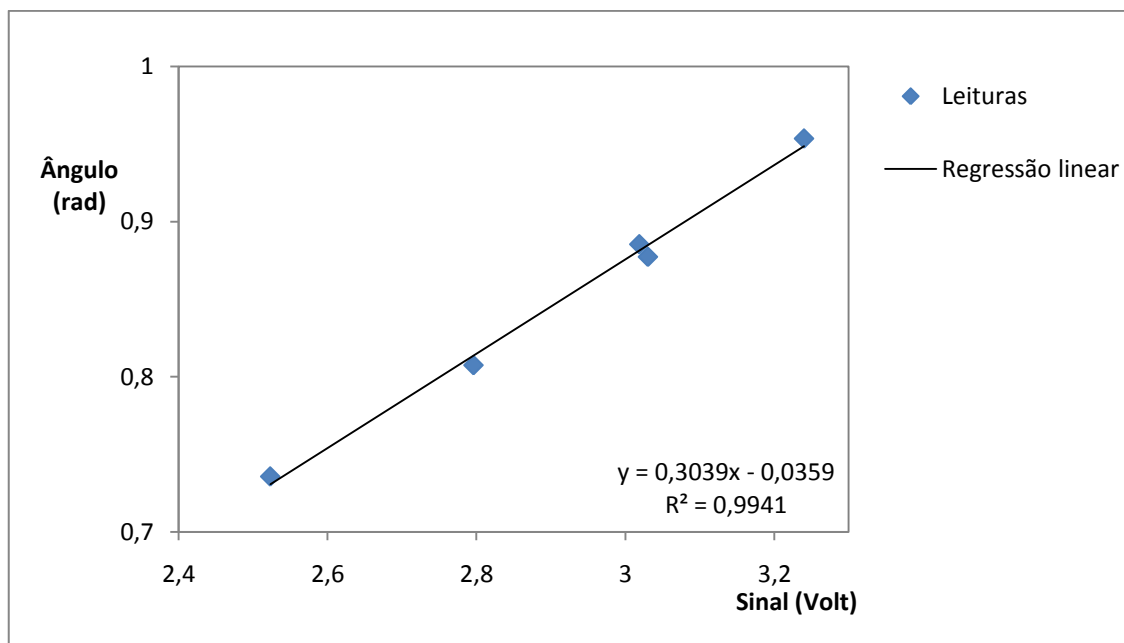


Figura I.25. Lei de calibração do dispositivo Flutuador/Potenciómetro, para gama de caudais mais baixa, relativa ao Degrau 16

Quadro I.39 Dados relativos à calibração do dispositivo flutuador potenciômetro para série de caudais mais altos

Degrau 16			
e	Sinal	A	α
Espessura das placas [mm]	[n=500]	Atura degrau centro de rotação [mm]	[Rad]
0,0	2,492	181,75	0,710
12,0	2,738	169,75	0,784
24,5	2,966	157,25	0,855
26,0	2,993	155,75	0,864
39,0	3,231	142,75	0,933

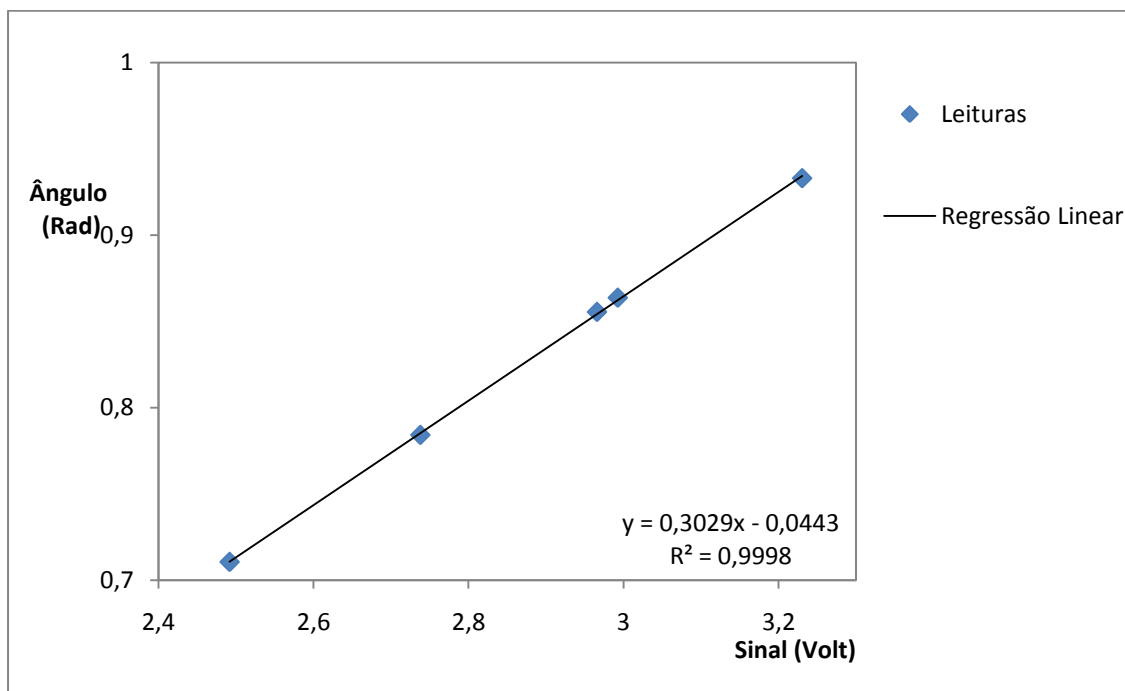


Figura I.26. Lei de calibração do dispositivo Flutuador/Potenciômetro, para gama de caudais mais alta, relativa ao Degrau 16

A15. RECTAS DE CALIBRAÇÃO DO DISPOSITIVO FLUTUADOR/POTENCIÓMETRO RELATIVO AO DEGRAU 17

Quadro I.40. Variáveis características do Degrau 17

Gama de Caudais	L Comprimento da vareta [mm]	B Altura degrau centro de rotação [mm]	D Diâmetro Flutuador [mm]
Caudais mais baixos	239.75	189	20.5
Caudais mais altos		194	

Quadro I.41 Dados relativos à calibração do dispositivo flutuador potenciómetro para série de caudais mais baixos.

Degrau 17			
e Espessura das placas [mm]	Sinal [n=500]	A Atura degrau centro de rotação [mm]	α [Rad]
0,0	2,432	178,75	0,729
12,0	2,675	166,75	0,802
24,5	2,903	154,25	0,872
26,0	2,923	152,75	0,880
39,0	3,156	139,75	0,949

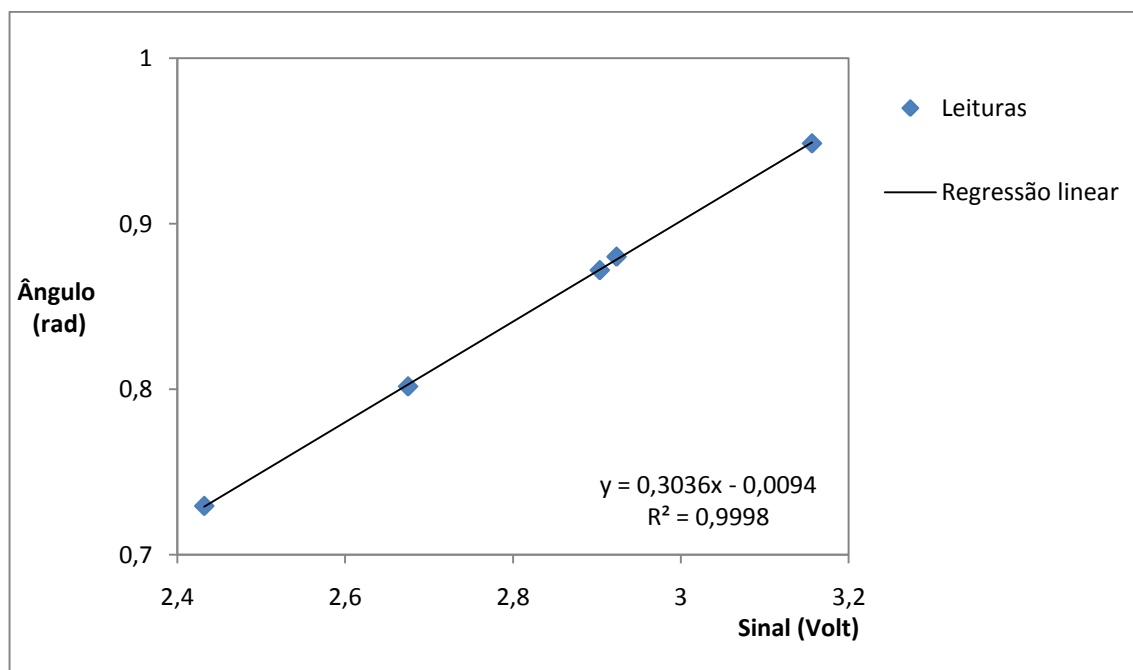


Figura I.27. Lei de calibração do dispositivo Flutuador/Potenciómetro, para gama de caudais mais baixa, relativa ao Degrau 17

Quadro I.42 Dados relativos à calibração do dispositivo flutuador potenciómetro para série de caudais mais altos

Degrau 17			
e	Sinal	A	α
Espessura das placas [mm]	[n=500]	Atura degrau centro de rotação [mm]	[Rad]
0,0	2,394	183,75	0,698
12,0	2,659	171,75	0,772
24,5	2,880	159,25	0,844
26,0	2,914	157,75	0,853
39,0	3,149	144,75	0,923

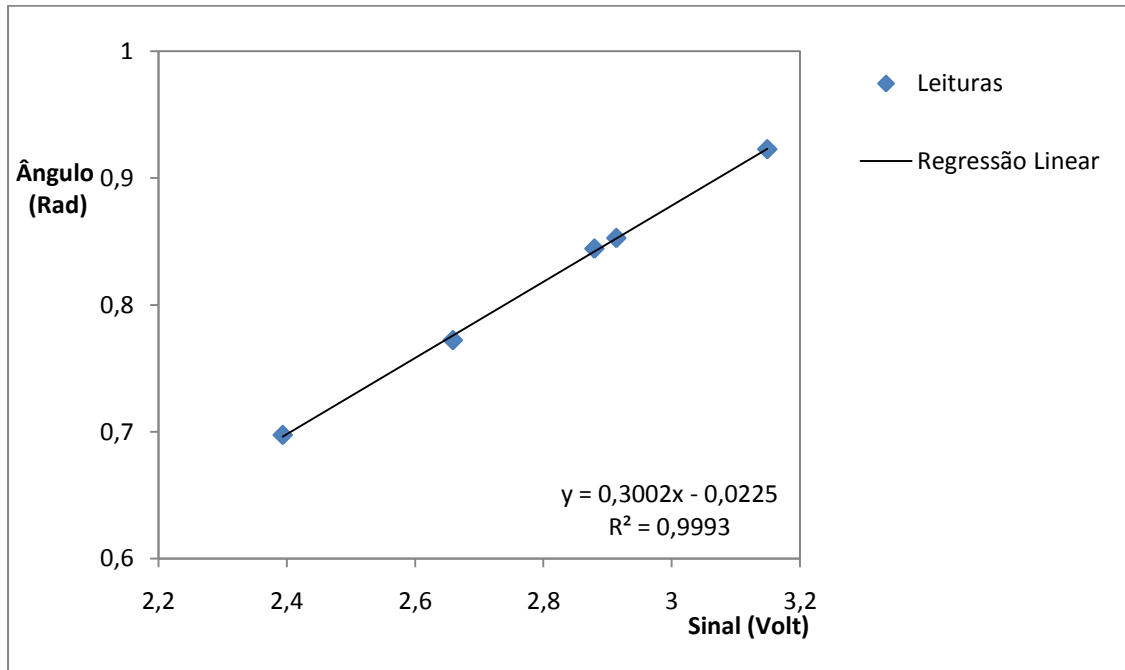


Figura I.28. Lei de calibração do dispositivo Flutuador/Potenciómetro, para gama de caudais mais alta, relativa ao Degrau 17

A16. RECTAS DE CALIBRAÇÃO DO DISPOSITIVO FLUTUADOR/POTENCIÓMETRO RELATIVO AO DEGRAU 18

Quadro I.43. Variáveis características do Degrau 18

Gama de Caudais	L Comprimento da vareta [mm]	B Altura degrau centro de rotação [mm]	D Diâmetro Flutuador [mm]
Caudais mais baixos	239.75	188	20.5
Caudais mais altos		192	

Quadro I.44 Dados relativos à calibração do dispositivo flutuador potenciómetro para série de caudais mais baixos.

Degrau 18			
e Espessura das placas [mm]	Sinal [n=500]	A Atura degrau centro de rotação [mm]	α [Rad]
0,0	2,481	177,75	0,736
12,0	2,670	165,75	0,807
24,5	2,935	153,25	0,877
26,0	2,959	151,75	0,885
39,0	3,170	138,75	0,954

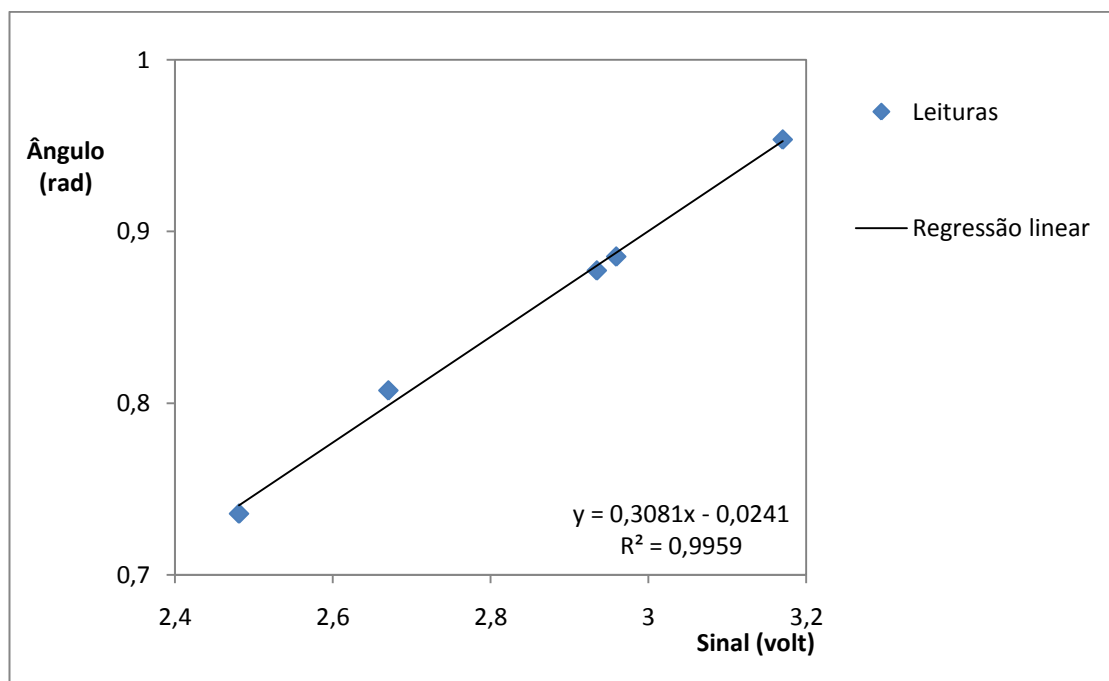


Figura I.29. Lei de calibração do dispositivo Flutuador/Potenciómetro, para gama de caudais mais baixa, relativa ao Degrau 18

Quadro I.45 Dados relativos à calibração do dispositivo flutuador potenciômetro para série de caudais mais altos

Degrau 18			
e	Sinal	A	α
Espessura das placas [mm]	[n=500]	Atura degrau centro de rotação [mm]	[Rad]
0,0	2,374	181,75	0,710
12,0	2,643	169,75	0,784
24,5	2,872	157,25	0,855
26,0	2,866	155,75	0,864
39,0	3,122	142,75	0,933

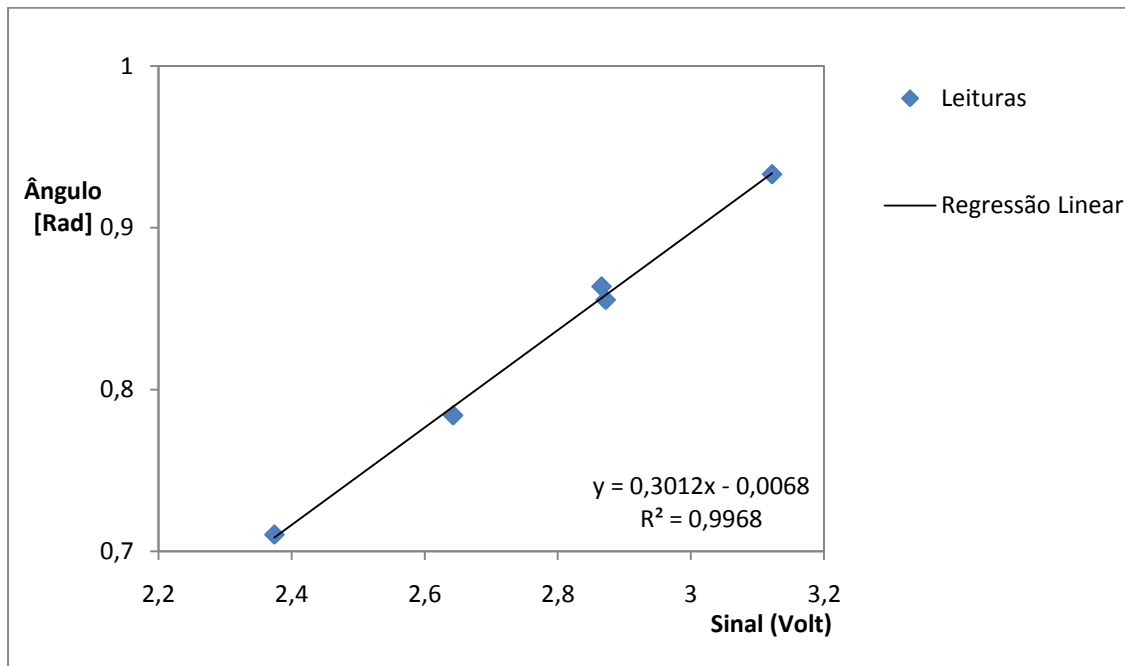


Figura I.30. Lei de calibração do dispositivo Flutuador/Potenciômetro, para gama de caudais mais alta, relativa ao Degrau 18

A17. RECTAS DE CALIBRAÇÃO DO DISPOSITIVO FLUTUADOR/POTENCIÓMETRO RELATIVO AO DEGRAU 19

Quadro I.46. Variáveis características do Degrau 19

Gama de Caudais	L Comprimento da vareta [mm]	B Altura degrau centro de rotação [mm]	D Diâmetro Flutuador [mm]
Caudais mais baixos	239.75	190	20.5
Caudais mais altos		193	

Quadro I.47 Dados relativos à calibração do dispositivo flutuador potenciómetro para série de caudais mais baixos.

Degrau 19			
e Espessura das placas [mm]	Sinal [n=500]	A Atura degrau centro de rotação [mm]	α [Rad]
0,0	2,440	179,75	0,723
12,0	2,690	167,75	0,796
24,5	2,876	155,25	0,866
26,0	2,935	153,75	0,875
39,0	3,152	140,75	0,943

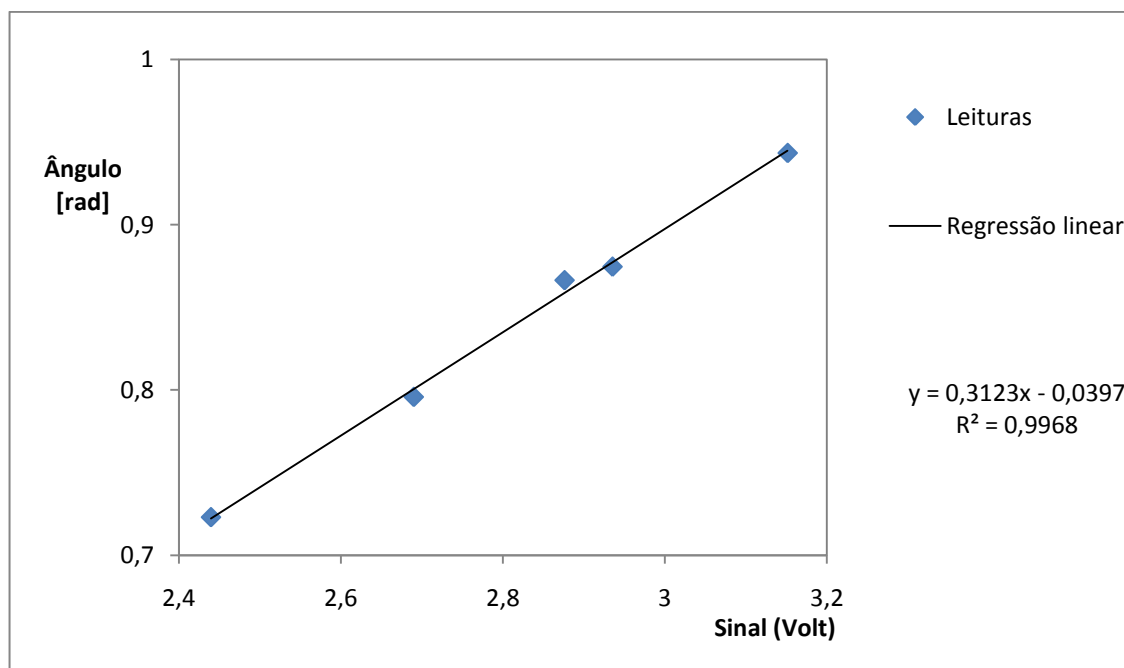


Figura I.31. . Lei de calibração do dispositivo Flutuador/Potenciómetro, para gama de caudais mais baixa, relativa ao Degrau 19

Quadro I.48 Dados relativos à calibração do dispositivo flutuador potenciômetro para série de caudais mais altos

Degrau 19			
e Espessura das placas [mm]	Sinal [n=500]	A Atura degrau centro de rotação [mm]	α [Rad]
0,0	2,402	182,75	0,704
12,0	2,668	170,75	0,778
24,5	2,884	158,25	0,850
26,0	2,880	156,75	0,858
39,0	3,129	143,75	0,928

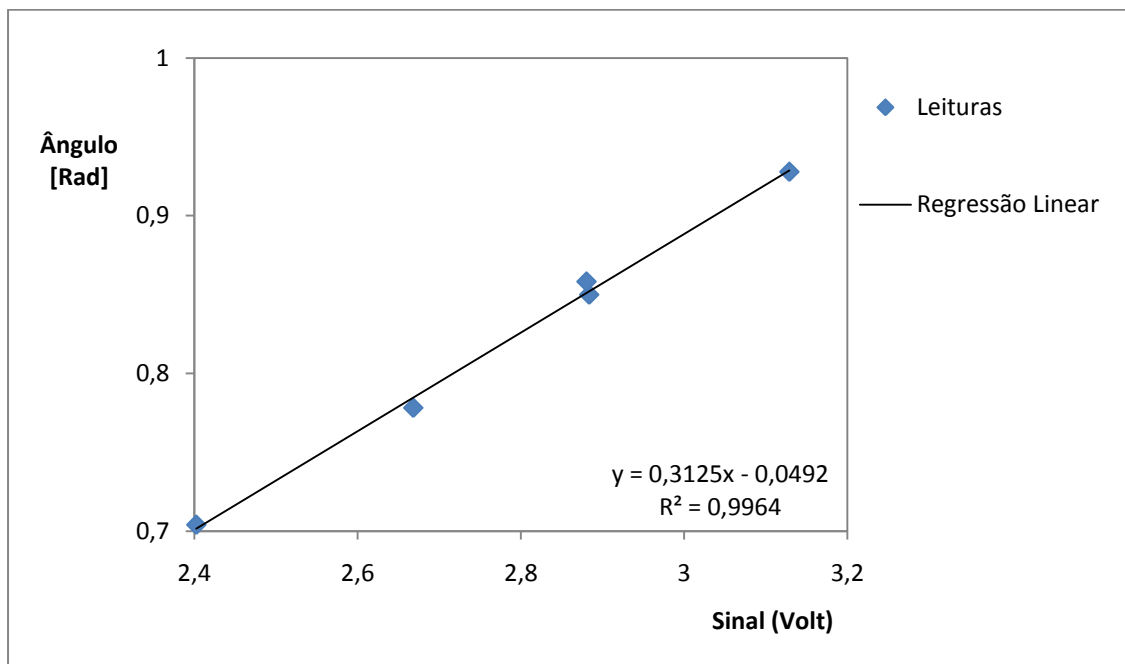


Figura I.32. Lei de calibração do dispositivo Flutuador/Potenciômetro, para gama de caudais mais alta, relativa ao Degrau 19

A18. RECTAS DE CALIBRAÇÃO DO DISPOSITIVO FLUTUADOR/POTENCIÓMETRO RELATIVO AO DEGRAU 20

Quadro I.49. Variáveis características do Degrau 20

Gama de Caudais	L Comprimento da vareta [mm]	B Altura degrau centro de rotação [mm]	D Diâmetro Flutuador [mm]
Caudais mais baixos	239.75	189	20.5
Caudais mais altos		194	

Quadro I.50 Dados relativos à calibração do dispositivo flutuador potenciómetro para série de caudais mais baixos.

Degrau 20			
e Espessura das placas [mm]	Sinal [n=500]	A Atura degrau centro de rotação [mm]	α [Rad]
0,0	2,411	178,75	0,729
12,0	2,684	166,75	0,802
24,5	2,874	154,25	0,872
26,0	2,898	152,75	0,880
39,0	3,118	139,75	0,949

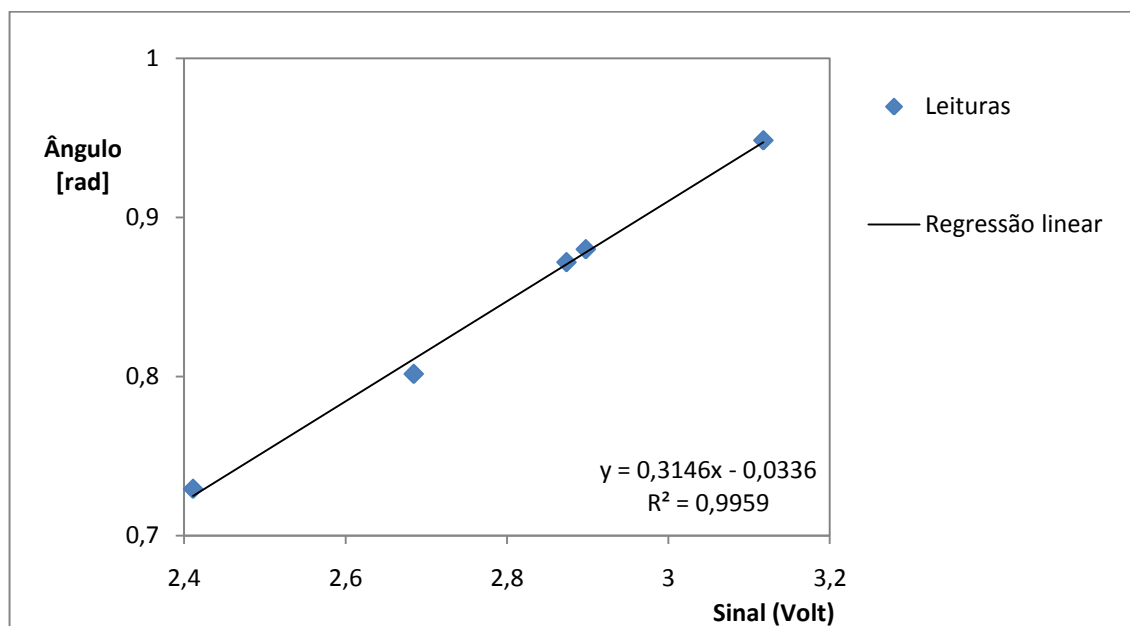


Figura I.33. Lei de calibração do dispositivo Flutuador/Potenciómetro, para gama de caudais mais baixa, relativa ao Degrau 20

Quadro I.51 Dados relativos à calibração do dispositivo flutuador potenciômetro para série de caudais mais altos

Degrau 20			
e	Sinal	A	α
Espessura das placas [mm]	[n=500]	Atura degrau centro de rotação [mm]	[Rad]
0,0	2,325	183,75	0,698
12,0	2,556	171,75	0,772
24,5	2,859	159,25	0,844
26,0	2,864	157,75	0,853
39,0	3,093	144,75	0,923

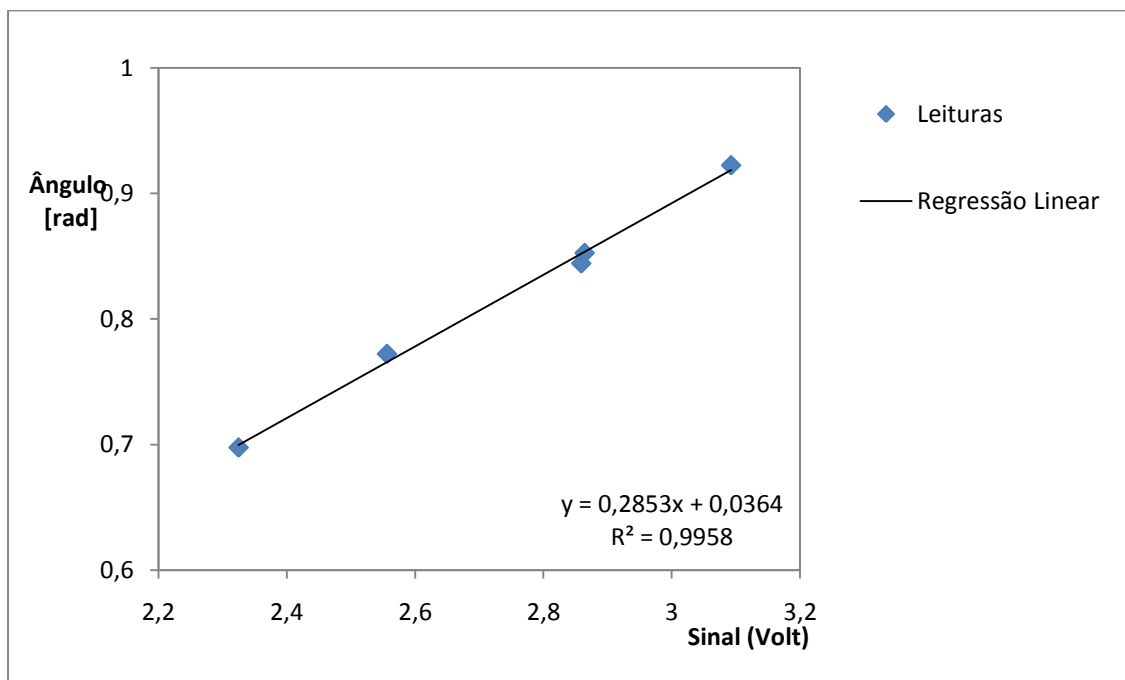


Figura I.34. Lei de calibração do dispositivo Flutuador/Potenciômetro, para gama de caudais mais alta, relativa ao Degrau 20

A19. RECTAS DE CALIBRAÇÃO DO DISPOSITIVO FLUTUADOR/POTENCIÓMETRO RELATIVO AO DEGRAU 21

Quadro I.52. Variáveis características do Degrau 21

Gama de Caudais	L Comprimento da vareta [mm]	B Altura degrau centro de rotação [mm]	D Diâmetro Flutuador [mm]
Caudais mais baixos	239.75	190	20.5
Caudais mais altos		194	

Quadro I.53 Dados relativos à calibração do dispositivo flutuador potenciómetro para série de caudais mais baixos.

Degrau 21			
e Espessura das placas [mm]	Sinal [n=500]	A Atura degrau centro de rotação [mm]	α [Rad]
0,0	2,461	179,75	0,723
12,0	2,697	167,75	0,796
24,5	2,906	155,25	0,866
26,0	2,940	153,75	0,875
39,0	3,160	140,75	0,943

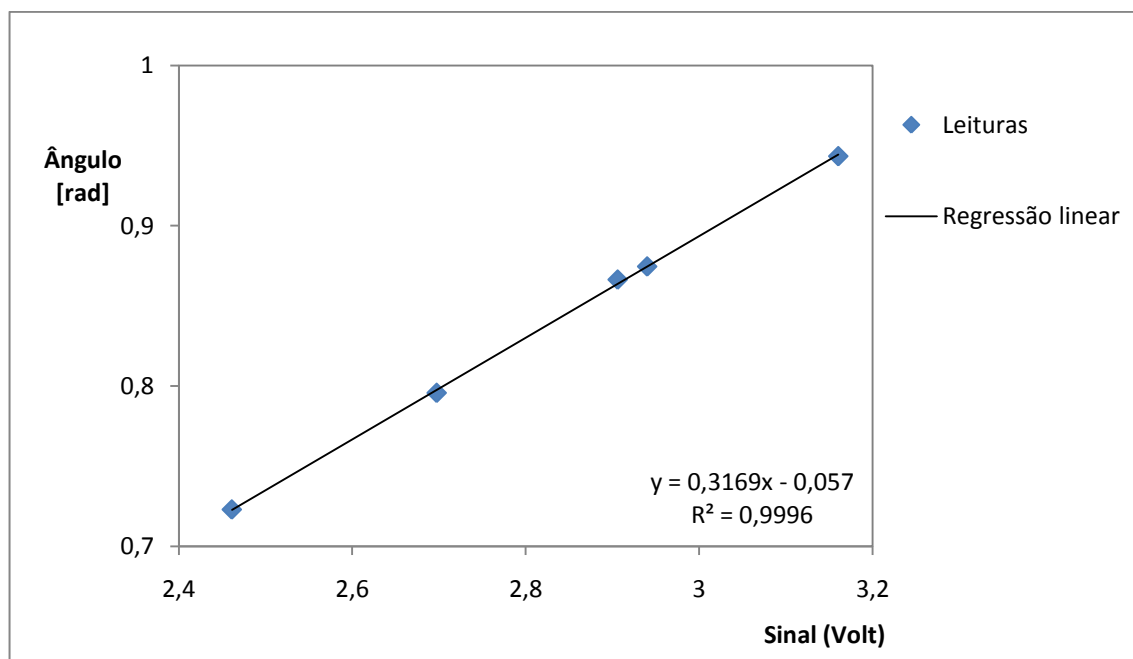


Figura I.35. Lei de calibração do dispositivo Flutuador/Potenciómetro, para gama de caudais mais baixa, relativa ao Degrau 21

Quadro I.54 Dados relativos à calibração do dispositivo flutuador potenciômetro para série de caudais mais altos

Degrau 21			
e	Sinal	A	α
Espessura das placas [mm]	[n=500]	Atura degrau centro de rotação [mm]	[Rad]
0,0	2,306	183,75	0,698
12,0	2,653	171,75	0,772
24,5	2,877	159,25	0,844
26,0	2,891	157,75	0,853
39,0	3,140	144,75	0,923

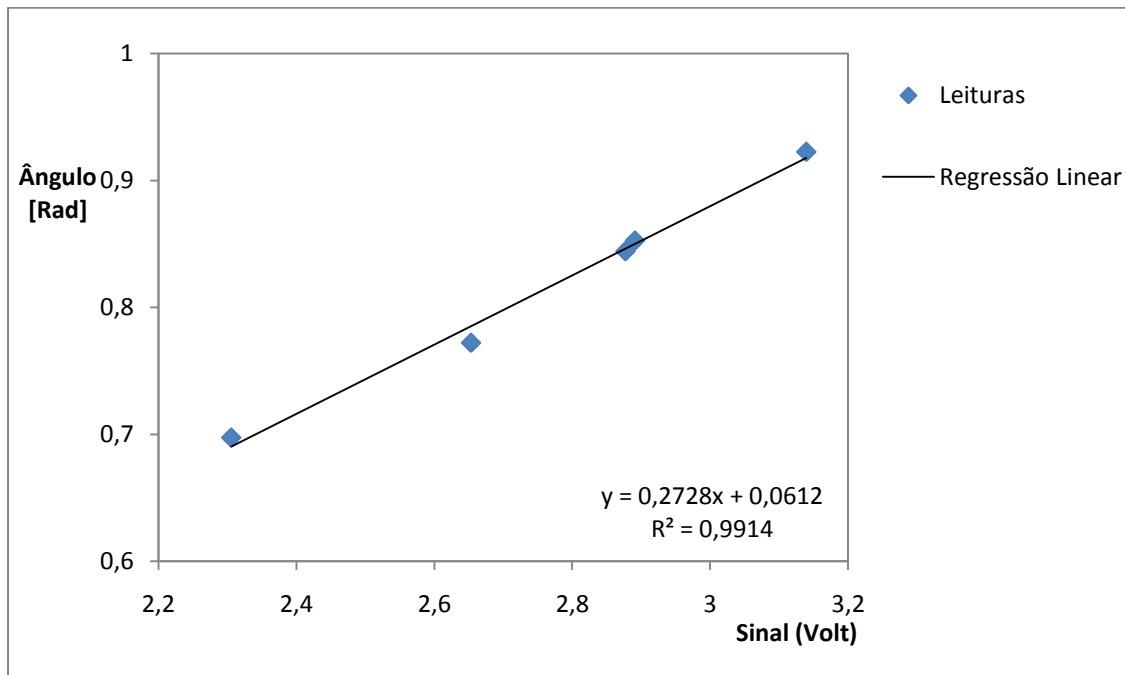


Figura I.36. Lei de calibração do dispositivo Flutuador/Potenciômetro, para gama de caudais mais alta, relativa ao Degrau 21

A20. RECTAS DE CALIBRAÇÃO DO DISPOSITIVO FLUTUADOR/POTENCIÓMETRO RELATIVO AO DEGRAU 22

Quadro I.55. Variáveis características do Degrau 22

Gama de Caudais	L Comprimento da vareta [mm]	B Altura degrau centro de rotação [mm]	D Diâmetro Flutuador [mm]
Caudais mais baixos	239.75	189	20.5
Caudais mais altos		192	

Quadro I.56 Dados relativos à calibração do dispositivo flutuador potenciómetro para série de caudais mais baixos.

Degrau 22			
e Espessura das placas [mm]	Sinal [n=500]	A Atura degrau centro de rotação [mm]	α [Rad]
0,0	2,412	178,75	0,729
12,0	2,659	166,75	0,802
24,5	2,928	154,25	0,872
26,0	2,948	152,75	0,880
39,0	3,165	139,75	0,949

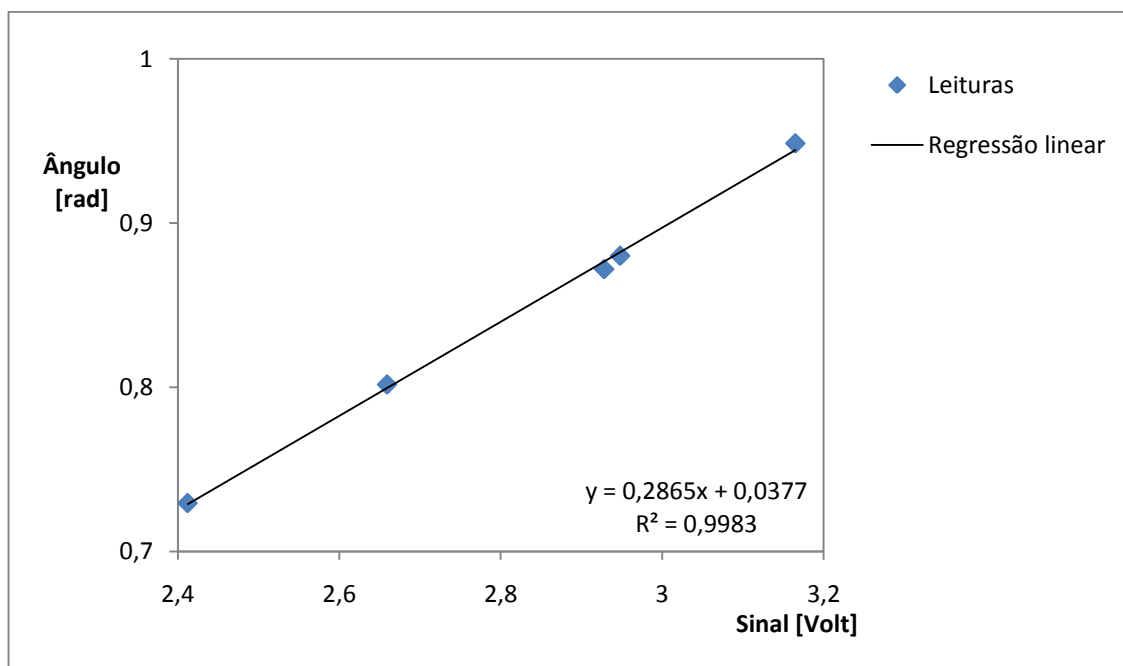


Figura I.37. Lei de calibração do dispositivo Flutuador/Potenciómetro, para gama de caudais mais baixa, relativa ao Degrau 22

Quadro I.57 Dados relativos à calibração do dispositivo flutuador potenciômetro para série de caudais mais altos

Degrau 22			
e Espessura das placas [mm]	Sinal [n=500]	A Atura degrau centro de rotação [mm]	α [Rad]
0,0	2,329	181,75	0,710
6,0	2,442	175,75	0,748
12,0	2,563	169,75	0,784
24,5	2,775	157,25	0,855
26,0	2,810	155,75	0,864
39,0	3,004	142,75	0,933

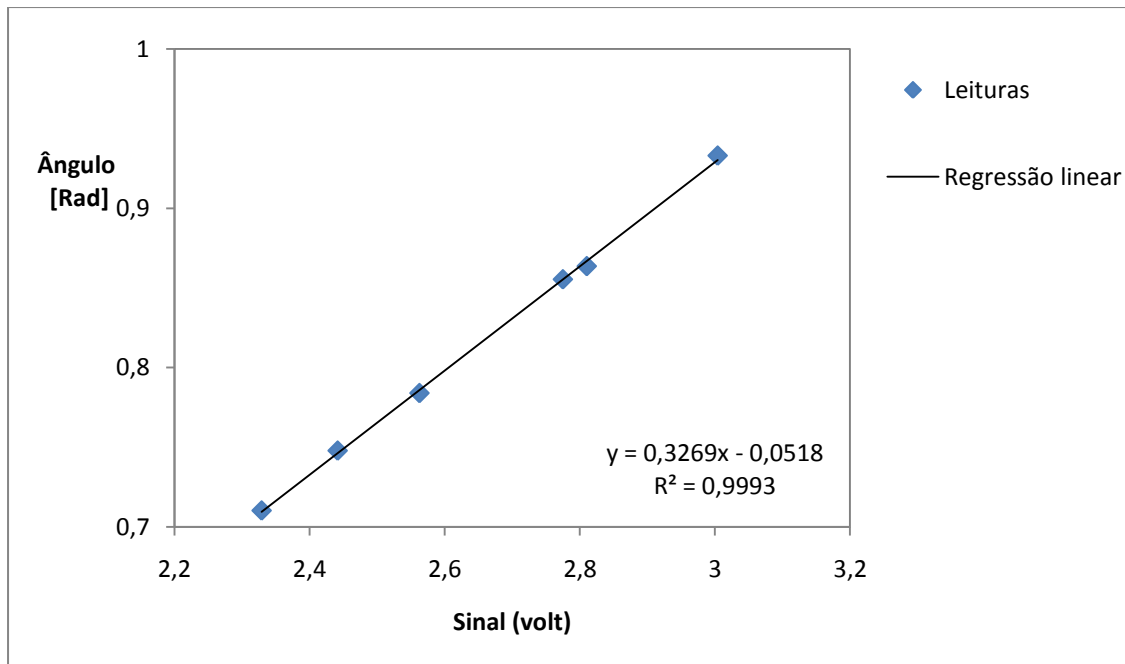


Figura I.38. Lei de calibração do dispositivo Flutuador/Potenciômetro, para gama de caudais mais alta, relativa ao Degrau 22

A21. RECTAS DE CALIBRAÇÃO DO DISPOSITIVO FLUTUADOR/POTENCIÓMETRO RELATIVO AO DEGRAU 23

Quadro I.58. Variáveis características do Degrau 23

Gama de Caudais	L Comprimento da vareta [mm]	B Altura degrau centro de rotação [mm]	D Diâmetro Flutuador [mm]
Caudais mais baixos	239.75	190	20.5
Caudais mais altos		194	

Quadro I.59 Dados relativos à calibração do dispositivo flutuador potenciómetro para série de caudais mais baixos.

Degrau 23			
e Espessura das placas [mm]	Sinal [n=500]	A Atura degrau centro de rotação [mm]	α [Rad]
0,0	2,451	179,75	0,723
12,0	2,670	167,75	0,796
24,5	2,903	155,25	0,866
26,0	2,913	153,75	0,875
39,0	3,132	140,75	0,943

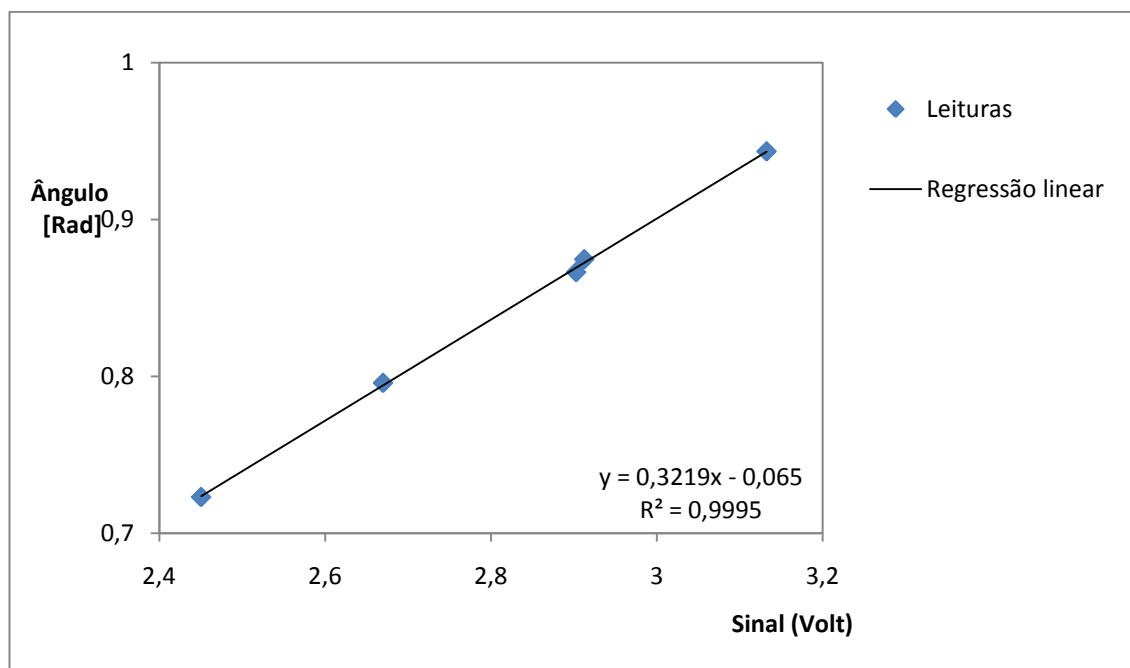


Figura I.39. Lei de calibração do dispositivo Flutuador/Potenciómetro, para gama de caudais mais baixa, relativa ao Degrau 23

Quadro I.60 Dados relativos à calibração do dispositivo flutuador potenciômetro para série de caudais mais altos

Degrau 23			
e	Sinal	A	α
Espessura das placas [mm]	[n=500]	Atura degrau centro de rotação [mm]	[Rad]
0,0	2,432	183,75	0,698
12,0	2,620	171,75	0,772
24,5	2,827	159,25	0,844
26,0	2,868	157,75	0,853
39,0	3,124	144,75	0,923

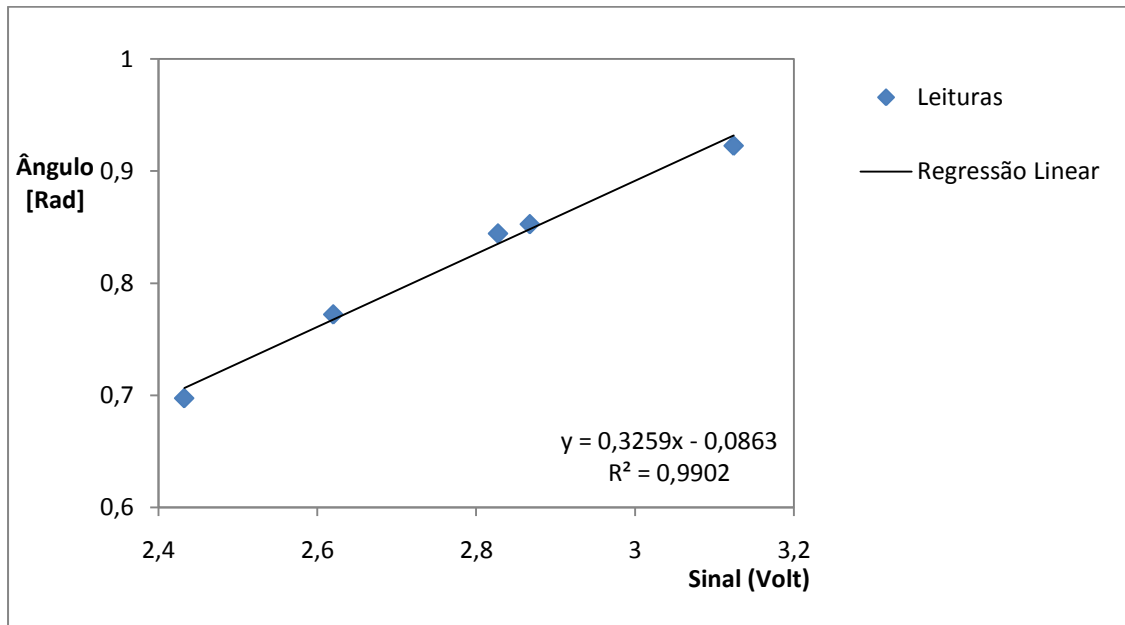


Figura I.40. Lei de calibração do dispositivo Flutuador/Potenciômetro, para gama de caudais mais alta, relativa ao Degrau 23

A22. RECTAS DE CALIBRAÇÃO DO DISPOSITIVO FLUTUADOR/POTENCIÓMETRO RELATIVO AO DEGRAU 24

Quadro I.61. Variáveis características do Degrau 24

Gama de Caudais	L Comprimento da vareta [mm]	B Altura degrau centro de rotação [mm]	D Diâmetro Flutuador [mm]
Caudais mais baixos	239.75	193	20.5
Caudais mais altos		197	

Quadro I.62 Dados relativos à calibração do dispositivo flutuador potenciómetro para série de caudais mais baixos.

Degrau 24			
e Espessura das placas [mm]	Sinal [n=500]	A Atura degrau centro de rotação [mm]	α [Rad]
0,0	2,416	182,75	0,704
12,0	2,636	170,75	0,778
24,5	2,830	158,25	0,850
26,0	2,879	156,75	0,858
39,0	3,115	143,75	0,928

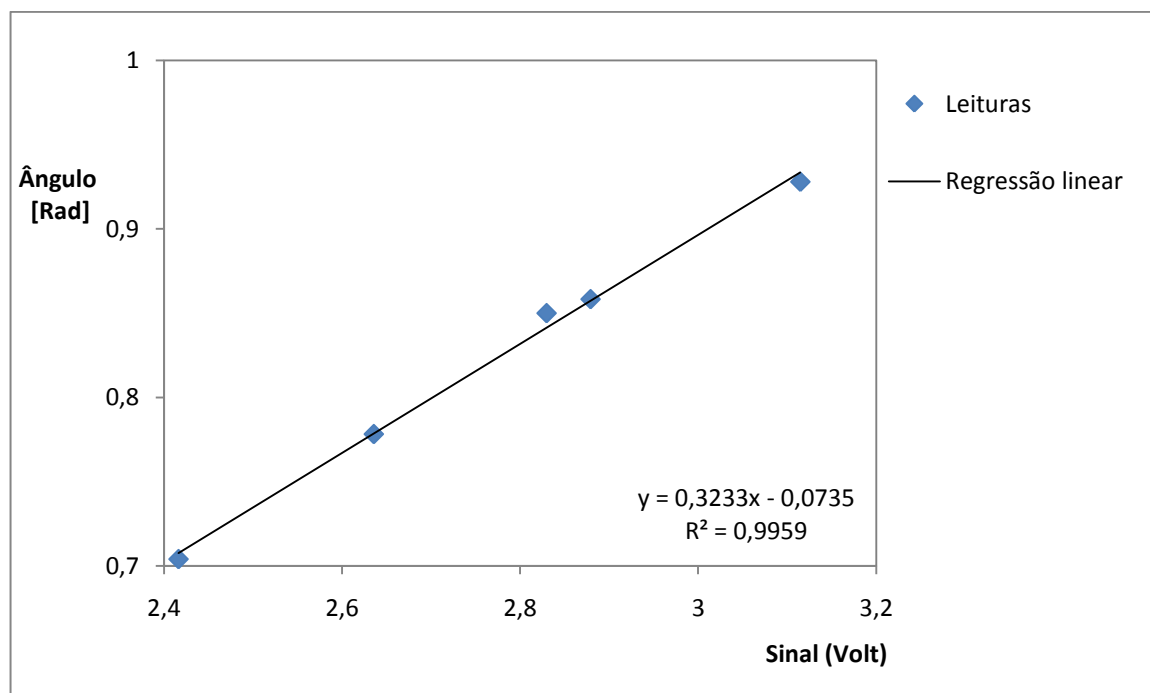


Figura I.41. Lei de calibração do dispositivo Flutuador/Potenciómetro, para gama de caudais mais baixa, relativa ao Degrau 24

Quadro I.63 Dados relativos à calibração do dispositivo flutuador potenciômetro para série de caudais mais altos

Degrau 24			
e Espessura placas [mm]	Sinal [n=500]	A Atura degrau centro de rotação [mm]	α [Rad]
0,0	2,326	186,75	0,678
12,0	2,595	174,75	0,754
24,5	2,814	162,25	0,827
26,0	2,842	160,75	0,836
39,0	3,102	147,75	0,907

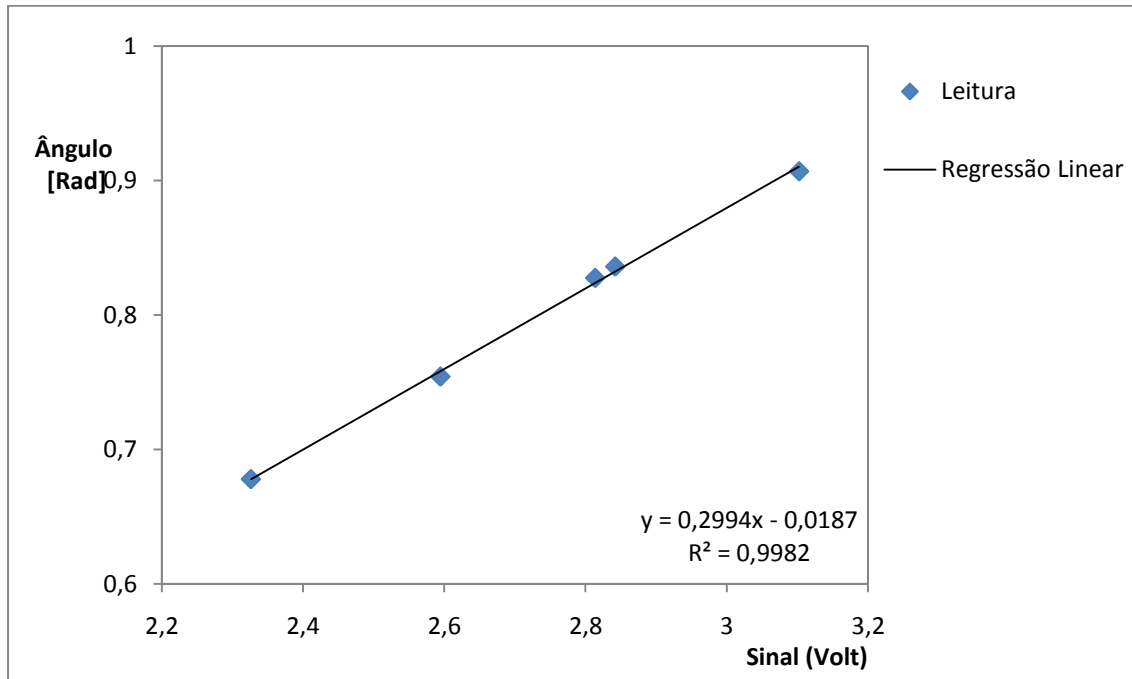


Figura I.42. Lei de calibração do dispositivo Flutuador/Potenciômetro, para gama de caudais mais alta, relativa ao Degrau 24

A23. RECTAS DE CALIBRAÇÃO DO DISPOSITIVO FLUTUADOR/POTENCIÓMETRO RELATIVO AO DEGRAU 25

Quadro I.64. Variáveis características do Degrau 25

Gama de Caudais	L Comprimento da vareta [mm]	B Altura degrau centro de rotação [mm]	D Diâmetro Flutuador [mm]
Caudais mais baixos	239.75	192	20.5
Caudais mais altos		195	

Quadro I.65 Dados relativos à calibração do dispositivo flutuador potenciómetro para série de caudais mais baixos.

Degrau 25			
e Espessura das placas [mm]	Sinal [n=500]	A Atura degrau centro de rotação [mm]	α [Rad]
0,0	2,431	181,75	0,710
12,0	2,669	169,75	0,784
24,5	2,897	157,25	0,855
26,0	2,919	155,75	0,864
38,5	3,130	143,25	0,930

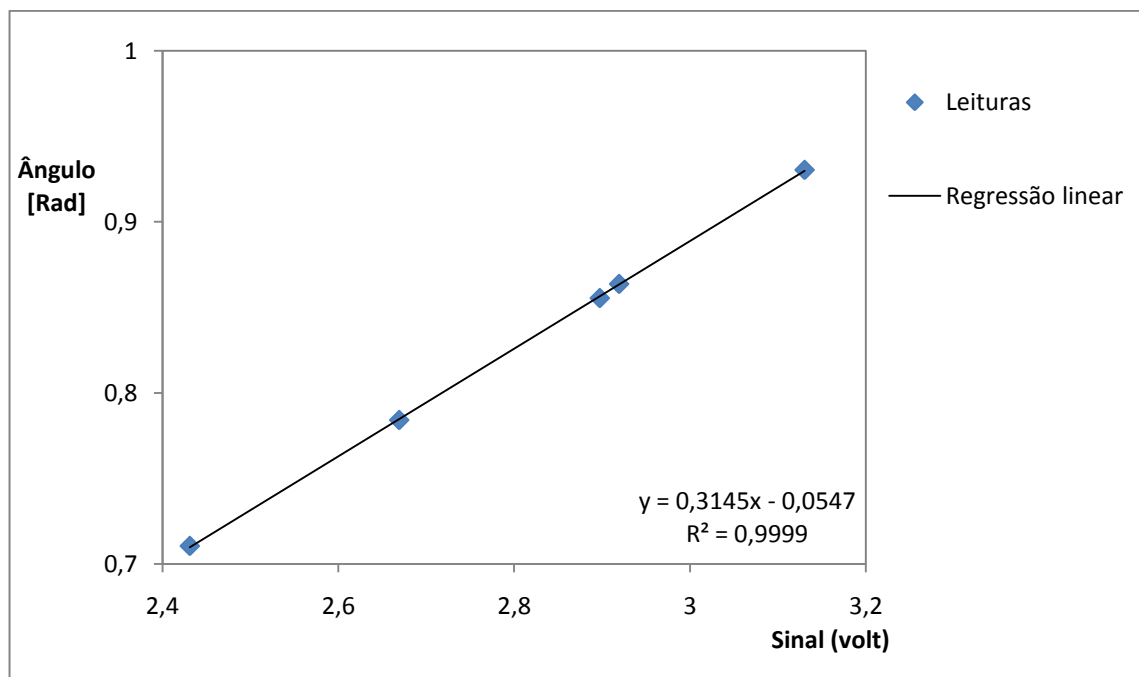


Figura I.43. Lei de calibração do dispositivo Flutuador/Potenciómetro, para gama de caudais mais baixa, relativa ao Degrau 25

Quadro I.66 Dados relativos à calibração do dispositivo flutuador potenciômetro para série de caudais mais altos

Degrau 25			
e	Sinal	A	α
Espessura das placas [mm]	[n=500]	Atura degrau centro de rotação [mm]	[Rad]
0,0	2,324	184,75	0,691
12,0	2,598	172,75	0,766
24,5	2,838	160,25	0,839
26,0	2,888	158,75	0,847
39,0	3,090	145,75	0,917

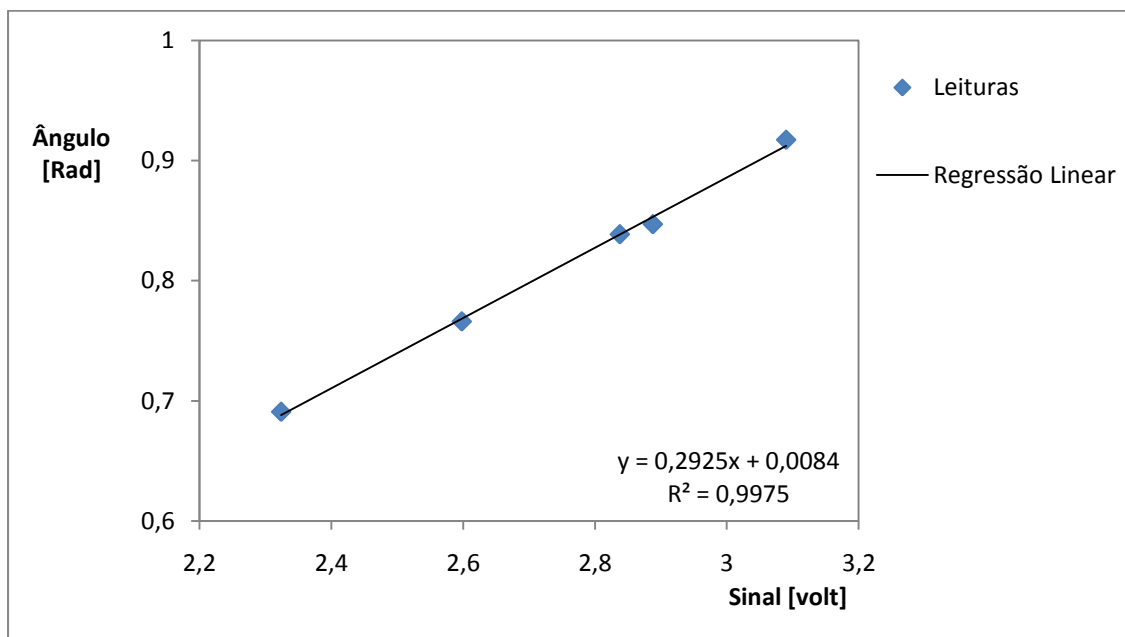


Figura I.44. Lei de calibração do dispositivo Flutuador/Potenciômetro, para gama de caudais mais alta, relativa ao Degrau 25

A24. RECTAS DE CALIBRAÇÃO DO DISPOSITIVO FLUTUADOR/POTENCIÓMETRO RELATIVO AO DEGRAU 26

Quadro I.67. Variáveis características do Degrau 26

Gama de Caudais	L Comprimento da vareta [mm]	B Altura degrau centro de rotação [mm]	D Diâmetro Flutuador [mm]
Caudais mais baixos	239.75	190	20.5
Caudais mais altos		195	

Quadro I.68 Dados relativos à calibração do dispositivo flutuador potenciómetro para série de caudais mais baixos.

Degrau 26			
e Espessura das placas [mm]	Sinal [n=500]	A Atura degrau centro de rotação [mm]	α [Rad]
0,0	2,460	179,75	0,723
12,0	2,740	167,75	0,796
24,5	2,921	155,25	0,866
26,0	2,962	153,75	0,875
38,5	3,158	141,25	0,941

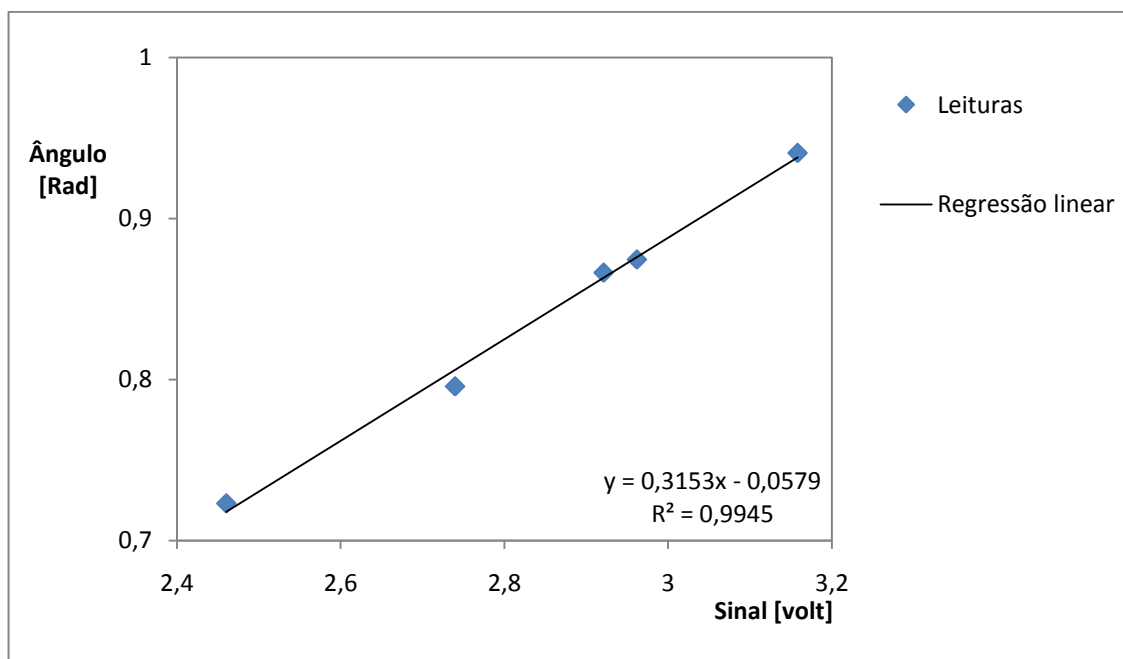


Figura I.45. Lei de calibração do dispositivo Flutuador/Potenciómetro, para gama de caudais mais baixa, relativa ao Degrau 26

Quadro I.69 Dados relativos à calibração do dispositivo flutuador potenciômetro para série de caudais mais altos

Degrau 26			
e	Sinal	A	α
Espessura das placas [mm]	[n=500]	Atura degrau centro de rotação [mm]	[Rad]
0,00	2,413	184,75	0,691
12,00	2,681	172,75	0,766
24,50	2,852	160,25	0,839
26,00	2,919	158,75	0,847
39,00	3,157	145,75	0,917

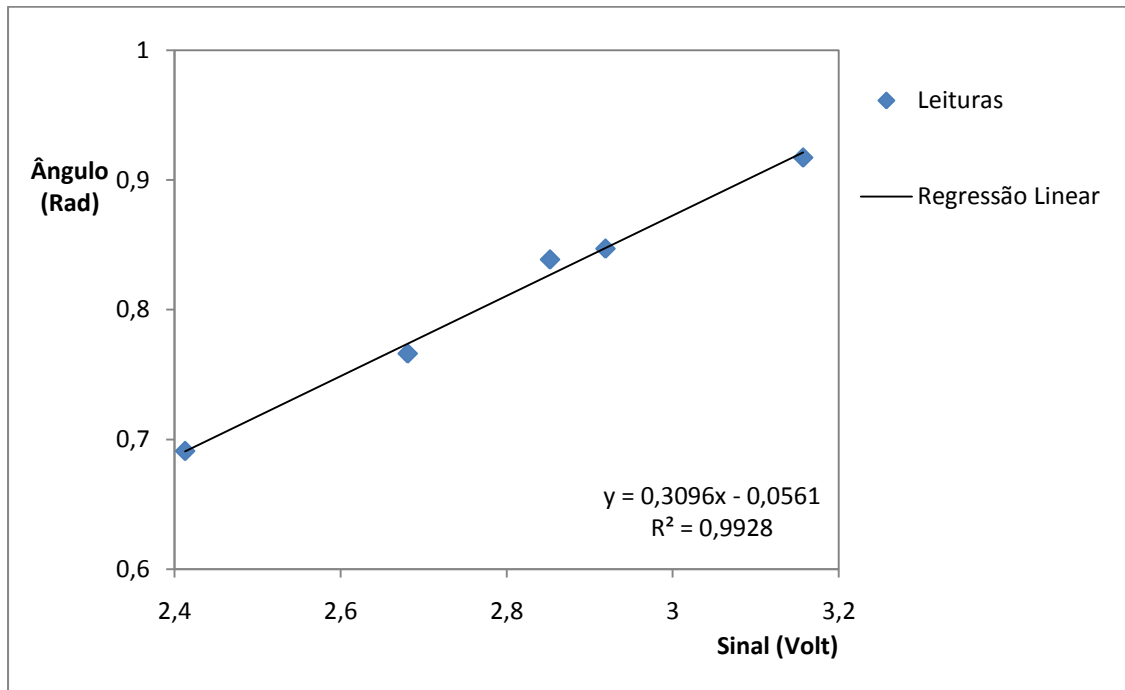


Figura I.46. Lei de calibração do dispositivo Flutuador/Potenciômetro, para gama de caudais mais alta, relativa ao Degrau 26

ANEXO II

CARACTERISTICAS DO DESCARREGADOR EM DEGRAUS

Quadro II.1. Características geométricas do modelo ensaiado.

Degrau	Comprimento do degrau [m]	Largura final do degrau [m]	Perfil do Descarregador [m]	Alturas acumuladas [m]	
	L	Bi	Hvi	1-26	Hdi
1	0,0996	0,1416	1,001	0,958	0,000
2	0,0996	0,1340	0,963	0,919	0,038
3	0,0996	0,1264	0,924	0,881	0,077
4	0,0996	0,1188	0,886	0,843	0,115
5	0,0996	0,1112	0,848	0,804	0,153
6	0,0996	0,1036	0,809	0,766	0,192
7	0,0996	0,0960	0,771	0,728	0,230
8	0,0996	0,0884	0,733	0,690	0,268
9	0,0996	0,0808	0,695	0,651	0,306
10	0,0996	0,0732	0,656	0,613	0,345
11	0,0996	0,0656	0,618	0,575	0,383
12	0,0996	0,0580	0,580	0,536	0,421
13	0,0996	0,0504	0,541	0,498	0,460
14	0,0996	0,0500	0,503	0,460	0,498
15	0,0996	0,0500	0,465	0,421	0,536
16	0,0996	0,0500	0,426	0,383	0,575
17	0,0996	0,0500	0,388	0,345	0,613
18	0,0996	0,0500	0,350	0,306	0,651
19	0,0996	0,0500	0,311	0,268	0,690
20	0,0996	0,0500	0,273	0,230	0,728
21	0,0996	0,0500	0,235	0,192	0,766
22	0,0996	0,0500	0,197	0,153	0,804
23	0,0996	0,0500	0,158	0,115	0,843
24	0,0996	0,0500	0,120	0,077	0,881
25	0,0996	0,0500	0,082	0,038	0,919
26	0,0996	0,0500	0,043	0,000	0,958

Nota: H é constante para todos os degraus, sendo aproximadamente 0,38 m.

Quadro II.2. Valores hc/H relativos ao modelo ensaiado no presente estudo.

Degraus	hc/H									
	Caudal (L/s)									
	0.25	0.50	0.82	1.05	1.24	1.50	1.69	1.92	2.19	2.29
1	0.180	0.285	0.400	0.467	0.522	0.593	0.642	0.699	0.763	0.786
2	0.186	0.296	0.415	0.485	0.542	0.615	0.666	0.725	0.792	0.816
3	0.194	0.307	0.431	0.504	0.563	0.640	0.693	0.754	0.823	0.848
4	0.202	0.320	0.449	0.526	0.587	0.667	0.722	0.786	0.858	0.884
5	0.211	0.335	0.470	0.549	0.614	0.697	0.754	0.821	0.897	0.924
6	0.221	0.351	0.492	0.576	0.643	0.730	0.791	0.861	0.940	0.968
7	0.233	0.369	0.518	0.606	0.677	0.768	0.832	0.906	0.989	1.019
8	0.246	0.390	0.547	0.640	0.715	0.812	0.879	0.957	1.045	1.076
9	0.261	0.414	0.581	0.680	0.759	0.862	0.933	1.016	1.109	1.143
10	0.279	0.443	0.621	0.726	0.811	0.921	0.997	1.085	1.185	1.221
11	0.300	0.476	0.668	0.781	0.873	0.991	1.073	1.168	1.275	1.313
12	0.326	0.517	0.725	0.848	0.947	1.075	1.164	1.268	1.384	1.426
13	0.358	0.568	0.796	0.931	1.040	1.181	1.279	1.392	1.520	1.566
14	0.359	0.571	0.800	0.936	1.045	1.187	1.285	1.399	1.527	1.574
15	0.359	0.571	0.800	0.936	1.045	1.187	1.285	1.399	1.527	1.574
16	0.359	0.571	0.800	0.936	1.045	1.187	1.285	1.399	1.527	1.574
17	0.359	0.571	0.800	0.936	1.045	1.187	1.285	1.399	1.527	1.574
18	0.359	0.571	0.800	0.936	1.045	1.187	1.285	1.399	1.527	1.574
19	0.359	0.571	0.800	0.936	1.045	1.187	1.285	1.399	1.527	1.574
20	0.359	0.571	0.800	0.936	1.045	1.187	1.285	1.399	1.527	1.574
21	0.359	0.571	0.800	0.936	1.045	1.187	1.285	1.399	1.527	1.574
22	0.359	0.571	0.800	0.936	1.045	1.187	1.285	1.399	1.527	1.574
23	0.359	0.571	0.800	0.936	1.045	1.187	1.285	1.399	1.527	1.574
24	0.359	0.571	0.800	0.936	1.045	1.187	1.285	1.399	1.527	1.574
25	0.359	0.571	0.800	0.936	1.045	1.187	1.285	1.399	1.527	1.574
26	0.359	0.571	0.800	0.936	1.045	1.187	1.285	1.399	1.527	1.574

ANEXO III

DISSIPACÃO DE ENERGIA

A1. VALORES DE DISSIPACÃO DE ENERGIA OBTIDOS EXPERIMENTALMENTE

Quadro III.1. Valores de dissipação de energia obtidos experimentalmente, referentes ao caudal médio ensaiado de 0,25L/s.

Degraus	Em	Er	ΔE	$\Delta E/Em$
1-2	*	*	*	*
1-3	1,015	0,930	0,085	0,084
1-4	1,015	0,893	0,123	0,121
1-5	1,015	0,855	0,161	0,158
1-6	1,015	0,817	0,198	0,195
1-7	1,015	0,779	0,236	0,232
1-8	1,015	0,743	0,273	0,269
1-9	1,015	0,705	0,310	0,306
1-10	1,015	0,669	0,346	0,341
1-11	1,015	0,632	0,383	0,378
1-12	1,015	0,598	0,418	0,411
1-13	1,015	0,564	0,451	0,444
1-14	1,015	0,525	0,490	0,483
1-15	*	*	*	*
1-16	*	*	*	*
1-17	1,015	0,409	0,607	0,597
1-18	1,015	0,375	0,640	0,630
1-19	1,015	0,334	0,681	0,671
1-20	1,015	0,293	0,722	0,711
1-21	1,015	0,255	0,760	0,749
1-22	1,015	0,219	0,797	0,785
1-23	1,015	0,175	0,840	0,828
1-24	1,015	0,141	0,875	0,862
1-25	1,015	0,101	0,915	0,901
1-26	1,015	0,064	0,951	0,937

Quadro III.2. Valores de dissipação de energia obtidos experimentalmente, referentes ao caudal médio ensaiado de 0,50L/s.

Degaus	Em	Er	ΔE	$\Delta E/Em$
1-2	*	*	*	*
1-3	1,022	0,937	0,084	0,082
1-4	1,022	0,900	0,121	0,119
1-5	1,022	0,864	0,157	0,154
1-6	1,022	0,825	0,197	0,193
1-7	1,022	0,790	0,232	0,227
1-8	1,022	0,753	0,268	0,263
1-9	1,022	0,723	0,299	0,292
1-10	1,022	0,684	0,338	0,331
1-11	1,022	0,652	0,370	0,362
1-12	1,022	0,628	0,393	0,385
1-13	1,022	0,591	0,431	0,422
1-14	1,022	0,542	0,479	0,469
1-15	*	*	*	*
1-16	1,022	0,477	0,544	0,533
1-17	*	*	*	*
1-18	1,022	0,403	0,618	0,605
1-19	1,022	0,368	0,654	0,640
1-20	1,022	0,322	0,700	0,685
1-21	1,022	0,287	0,735	0,720
1-22	1,022	0,236	0,786	0,769
1-23	1,022	0,216	0,806	0,789
1-24	1,022	0,168	0,853	0,835
1-25	1,022	0,133	0,889	0,870
1-26	1,022	0,097	0,925	0,905

Quadro III.3. Valores de dissipação de energia obtidos experimentalmente, referentes ao caudal médio ensaiado de 0,82 L/s.

Degraus	Em	Er	ΔE	$\Delta E/E_m$
1-2	*	*	*	*
1-3	1,024	0,952	0,072	0,071
1-4	1,024	0,911	0,114	0,111
1-5	1,024	0,885	0,139	0,136
1-6	1,024	0,839	0,185	0,181
1-7	1,024	0,806	0,218	0,213
1-8	1,024	0,774	0,251	0,245
1-9	1,024	0,748	0,276	0,270
1-10	1,024	0,712	0,312	0,305
1-11	1,024	0,684	0,340	0,332
1-12	1,024	0,650	0,374	0,365
1-13	1,024	0,630	0,394	0,385
1-14	1,024	0,577	0,448	0,437
1-15	*	*	*	*
1-16	1,024	0,493	0,531	0,518
1-17	1,024	0,456	0,568	0,555
1-18	1,024	0,419	0,606	0,591
1-19	1,024	0,381	0,643	0,628
1-20	1,024	0,349	0,675	0,659
1-21	1,024	0,312	0,713	0,696
1-22	1,024	0,261	0,763	0,745
1-23	1,024	0,233	0,791	0,773
1-24	1,024	0,198	0,827	0,807
1-25	1,024	0,153	0,871	0,851
1-26	1,024	0,119	0,906	0,884

Quadro III.4 Valores de dissipação de energia obtidos experimentalmente, referentes ao caudal médio ensaiado de 1.05 L/s.

Degaus	Em	Er	ΔE	$\Delta E/Em$
1-2	*	*	*	*
1-3	1,027	0,980	0,047	0,045
1-4	1,027	0,941	0,086	0,084
1-5	1,027	0,919	0,108	0,105
1-6	1,027	0,863	0,164	0,159
1-7	*	*	*	*
1-8	1,027	0,810	0,216	0,211
1-9	1,027	0,796	0,231	0,225
1-10	1,027	0,749	0,278	0,270
1-11	1,027	0,721	0,305	0,297
1-12	1,027	0,662	0,365	0,355
1-13	1,027	0,645	0,382	0,372
1-14	1,027	0,598	0,429	0,418
1-15	*	*	*	*
1-16	1,027	0,557	0,470	0,458
1-17	1,027	0,496	0,531	0,517
1-18	1,027	0,475	0,552	0,538
1-19	1,027	0,423	0,604	0,588
1-20	1,027	0,390	0,637	0,620
1-21	1,027	0,358	0,669	0,651
1-22	1,027	0,298	0,729	0,710
1-23	1,027	0,309	0,717	0,699
1-24	1,027	0,252	0,775	0,755
1-25	1,027	0,193	0,833	0,812
1-26	1,027	0,165	0,862	0,839

Quadro III.5 Valores de dissipação de energia obtidos experimentalmente, referentes ao caudal médio ensaiado de 1.24 L/s.

Degraus	Em	Er	ΔE	$\Delta E/Em$
1-2	*	*	*	*
1-3	1,030	0,967	0,063	0,061
1-4	1,030	0,930	0,100	0,097
1-5	1,030	0,898	0,132	0,128
1-6	1,030	0,850	0,180	0,175
1-7	1,030	0,820	0,210	0,204
1-8	1,030	0,793	0,237	0,230
1-9	*	*	*	*
1-10	1,030	0,740	0,290	0,281
1-11	1,030	0,706	0,324	0,315
1-12	1,030	0,655	0,375	0,364
1-13	1,030	0,633	0,397	0,385
1-14	1,030	0,588	0,442	0,429
1-15	*	*	*	*
1-16	1,030	0,525	0,505	0,490
1-17	1,030	0,476	0,554	0,538
1-18	1,030	0,446	0,584	0,567
1-19	1,030	0,406	0,624	0,606
1-20	1,030	0,367	0,663	0,643
1-21	1,030	0,337	0,693	0,673
1-22	1,030	0,283	0,747	0,726
1-23	*	*	*	*
1-24	1,030	0,211	0,819	0,795
1-25	1,030	0,176	0,854	0,829
1-26	1,030	0,146	0,884	0,858

Quadro III.6 Valores de dissipação de energia obtidos experimentalmente, referentes ao caudal médio ensaiado de 1,50 L/s.

Degaus	Em	Er	ΔE	$\Delta E/Em$
1-2	*	*	*	*
1-3	1,034	0,980	0,054	0,052
1-4	1,034	0,941	0,093	0,090
1-5	1,034	0,919	0,115	0,111
1-6	1,034	0,863	0,171	0,165
1-7	*	*	*	*
1-8	1,034	0,810	0,224	0,216
1-9	1,034	0,796	0,238	0,230
1-10	1,034	0,749	0,285	0,276
1-11	1,034	0,721	0,313	0,302
1-12	1,034	0,662	0,372	0,360
1-13	1,034	0,645	0,389	0,377
1-14	1,034	0,598	0,436	0,422
1-15	*	*	*	*
1-16	1,034	0,557	0,477	0,462
1-17	1,034	0,496	0,539	0,521
1-18	1,034	0,475	0,559	0,541
1-19	1,034	0,423	0,611	0,591
1-20	1,034	0,390	0,644	0,623
1-21	1,034	0,358	0,676	0,654
1-22	1,034	0,298	0,736	0,712
1-23	1,034	0,309	0,725	0,701
1-24	1,034	0,252	0,783	0,757
1-25	1,034	0,193	0,841	0,813
1-26	1,034	0,165	0,869	0,840

Quadro III.7 Valores de dissipação de energia obtidos experimentalmente, referentes ao caudal médio ensaiado de 1,69 L/s

Degraus	Em	Er	ΔE	$\Delta E/E_m$
1-2	*	*	*	*
1-3	1,037	0,991	0,046	0,044
1-4	1,037	0,956	0,081	0,078
1-5	1,037	0,927	0,110	0,106
1-6	1,037	0,886	0,151	0,145
1-7	1,037	0,845	0,192	0,185
1-8	1,037	0,834	0,203	0,196
1-9	1,037	0,790	0,247	0,238
1-10	1,037	0,763	0,274	0,264
1-11	1,037	0,728	0,309	0,298
1-12	1,037	0,677	0,360	0,347
1-13	1,037	0,670	0,367	0,354
1-14	1,037	0,626	0,411	0,396
1-15	*	*	*	*
1-16	1,037	0,543	0,494	0,476
1-17	1,037	0,504	0,533	0,514
1-18	1,037	0,477	0,560	0,540
1-19	1,037	0,442	0,595	0,574
1-20	1,037	0,390	0,647	0,624
1-21	1,037	0,359	0,678	0,654
1-22	1,037	0,304	0,733	0,707
1-23	1,037	0,300	0,737	0,711
1-24	1,037	0,249	0,788	0,760
1-25	1,037	0,203	0,834	0,804
1-26	1,037	0,191	0,846	0,815

Quadro III.8 Valores de dissipação de energia obtidos experimentalmente, referentes ao caudal médio ensaiado de 1,92 L/s.

Degaus	Em	Er	ΔE	$\Delta E/Em$
1-2	*	*	*	*
1-3	1,040	0,993	0,047	0,045
1-4	1,040	0,961	0,079	0,076
1-5	1,040	0,947	0,093	0,089
1-6	1,040	0,896	0,144	0,138
1-7	1,040	0,864	0,176	0,169
1-8	1,040	0,859	0,181	0,174
1-9	1,040	0,809	0,231	0,222
1-10	1,040	0,768	0,272	0,261
1-11	1,040	0,730	0,310	0,298
1-12	1,040	0,672	0,368	0,354
1-13	1,040	0,681	0,359	0,345
1-14	1,040	0,644	0,396	0,381
1-15	*	*	*	*
1-16	1,040	0,552	0,488	0,469
1-17	1,040	0,522	0,518	0,498
1-18	1,040	0,484	0,556	0,534
1-19	1,040	0,457	0,583	0,561
1-20	1,040	0,404	0,636	0,611
1-21	1,040	0,373	0,667	0,642
1-22	1,040	0,309	0,731	0,703
1-23	1,040	0,287	0,753	0,724
1-24	1,040	0,257	0,783	0,753
1-25	1,040	0,215	0,825	0,794
1-26	1,040	0,185	0,855	0,822

Quadro III.9 Valores de dissipação de energia obtidos experimentalmente, referentes ao caudal médio ensaiado de 2,19 L/s.

Degraus	Em	Er	ΔE	$\Delta E/Em$
1-2	*	*	*	*
1-3	1,044	0,994	0,049	0,047
1-4	1,044	0,960	0,084	0,080
1-5	1,044	0,980	0,064	0,061
1-6	1,044	0,918	0,126	0,121
1-7	1,044	0,856	0,187	0,180
1-8	1,044	0,857	0,186	0,178
1-9	1,044	0,799	0,244	0,234
1-10	1,044	0,776	0,268	0,256
1-11	1,044	0,739	0,304	0,292
1-12	1,044	0,688	0,356	0,341
1-13	1,044	0,683	0,360	0,345
1-14	1,044	0,644	0,400	0,383
1-15	1,044	0,000	1,044	1,000
1-16	1,044	0,560	0,484	0,464
1-17	1,044	0,523	0,521	0,499
1-18	1,044	0,493	0,551	0,528
1-19	1,044	0,462	0,582	0,558
1-20	1,044	0,413	0,631	0,604
1-21	1,044	0,376	0,667	0,640
1-22	1,044	0,314	0,729	0,699
1-23	1,044	0,311	0,733	0,702
1-24	1,044	0,270	0,774	0,742
1-25	1,044	0,222	0,822	0,787
1-26	1,044	0,203	0,840	0,805

Quadro III.10 Valores de dissipação de energia obtidos experimentalmente, referentes ao caudal médio ensaiado de 2,29 L/s.

Degraus	Em	Er	ΔE	$\Delta E/Em$
1-2	*	*	*	*
1-3	1,045	1,006	0,039	0,037
1-4	1,045	0,977	0,068	0,065
1-5	1,045	1,062	-0,017	-0,016
1-6	1,045	0,918	0,127	0,122
1-7	1,045	0,870	0,175	0,167
1-8	1,045	0,894	0,151	0,145
1-9	1,045	0,820	0,225	0,215
1-10	1,045	0,782	0,263	0,251
1-11	1,045	0,746	0,299	0,286
1-12	1,045	0,698	0,347	0,332
1-13	1,045	0,700	0,345	0,330
1-14	1,045	0,666	0,379	0,363
1-15	*	*	*	*
1-16	1,045	0,607	0,438	0,419
1-17	1,045	0,555	0,490	0,469
1-18	1,045	0,517	0,528	0,505
1-19	1,045	0,483	0,562	0,538
1-20	1,045	0,431	0,614	0,587
1-21	*	*	*	*
1-22	1,045	0,336	0,709	0,679
1-23	1,045	0,326	0,719	0,688
1-24	1,045	0,280	0,765	0,732
1-25	1,045	0,245	0,800	0,766
1-26	1,045	0,220	0,825	0,789

A2. COMPARAÇÃO ENTRE VALORES DE DISSIPAÇÃO DE ENERGIA OBTIDOS EXPERIMENTALMENTE E VALORES OBTIDOS PELAS PROPOSTAS DE CHANSON, ANDRÉ E RAMOS E STEPHENSON PARA ESCOAMENTO DESLIZANTE SOBRE TURBILHÕES (ESCOAMENTO DE TRANSIÇÃO ADOPTA AS CARACTERÍSTICAS DO PRESENTE REGIME DE ESCOAMENTO)

Quadro III.11. Valores de dissipação de energia obtidos experimentalmente entre a crista do descarregador e do degrau 26, para 1.05L/s.

Caudal [L/s]	1,05
$\frac{\Delta E}{E_m}$ (prático)	0,839
$\frac{Er}{H_{máx}}$ (prático)	0,148

Quadro III.12. Valores obtidos por cada proposta aplicada no presente caso, para diferentes factores de resistencia (f), comparativamente com os valores obtidos experimentalmente para o caudal 1,05 L/s.

f	$\frac{\Delta E}{E_m}^1$	$\frac{Er}{H_{máx}}$	$\frac{\Delta E}{E_m}^2$
0,05	0,862	0,138	0,858
	-3%	7%	-2%
0,10	0,910	0,090	0,908
	-8%	39%	-8%
0,105	0,912	0,087	0,910
	-9%	41%	-8%
0,15	0,929	0,071	0,927
	-11%	52%	-11%
0,17	0,934	0,066	0,932
	-11%	56%	-11%
0,20	0,940	0,060	0,938
	-12%	59%	-12%
0,28	0,949	0,050	0,948
	-13%	66%	-13%
0,30	0,951	0,048	0,950
	-13%	67%	-13%

Quadro III.13. Valores de dissipação de energia obtidos experimentalmente entre a crista do descarregador e do degrau 26, para 1.24 L/s.

Caudal [L/s]	1,24
$\frac{\Delta E}{E_m}$ (prático)	0,858
$\frac{Er}{H_{m\acute{a}x}}$ (prático)	0,166

Quadro III.14. Valores obtidos por cada proposta aplicada no presente caso, para diferentes factores de resistencia (f), comparativamente com os valores obtidos experimentalmente para o caudal 1,24 L/s

f	$\frac{\Delta E}{E_m} 1$	$\frac{Er}{H_{m\acute{a}x}}$	$\frac{\Delta E}{E_m} 2$
0,05	0,846	0,154	0,841
	1%	8%	2%
0,10	0,900	0,100	0,897
	-5%	40%	-5%
0,105	0,903	0,097	0,900
	-5%	42%	-5%
0,15	0,921	0,079	0,919
	-7%	53%	-7%
0,17	0,926	0,073	0,925
	-8%	56%	-8%
0,20	0,933	0,067	0,931
	-9%	60%	-9%
0,28	0,944	0,056	0,942
	-10%	66%	-10%
0,30	0,945	0,054	0,944
	-10%	68%	-10%

Quadro III.15. Valores de dissipação de energia obtidos experimentalmente entre a crista do descarregador e do degrau 26, para 1.50 L/s.

Caudal [L/s]	1,50
$\frac{\Delta E}{Em}$ (prático)	0,840
$\frac{Er}{H_{máx}}$ (prático)	0,192

Quadro III.16. Valores obtidos por cada proposta aplicada no presente caso, para diferentes factores de resistencia (f), comparativamente com os valores obtidos experimentalmente para o caudal 1,50 L/s

f	$\frac{\Delta E}{Em}$ 1	$\frac{Er}{H_{máx}}$	$\frac{\Delta E}{Em}$ 2
0,05	0,826	0,174	0,820
	2%	10%	2%
0,10	0,886	0,113	0,883
	-5%	41%	-5%
0,105	0,890	0,110	0,886
	-6%	43%	-5%
0,15	0,911	0,089	0,908
	-8%	54%	-8%
0,17	0,917	0,083	0,914
	-9%	57%	-9%
0,20	0,924	0,076	0,922
	-10%	61%	-10%
0,28	0,936	0,063	0,935
	-11%	67%	-11%
0,30	0,938	0,061	0,937
	-12%	68%	-11%

Quadro III.17. Valores de dissipação de energia obtidos experimentalmente entre a crista do descarregador e do degrau 26, para 1.69 L/s.

Caudal [L/s]	1,69
$\frac{\Delta E}{Em}$ (prático)	0,815
$\frac{Er}{H_{m\acute{a}x}}$ (prático)	0,185

Quadro III.18. Valores obtidos por cada proposta aplicada no presente caso, para diferentes factores de resistencia (f), comparativamente com os valores obtidos experimentalmente para o caudal 1,69 L/s

f	$\frac{\Delta E}{Em} 1$	$\frac{Er}{H_{m\acute{a}x}}$	$\frac{\Delta E}{Em} 2$
0,05	0,812	0,188	0,805
	0%	-1%	1%
0,10	0,877	0,122	0,873
	-8%	34%	-7%
0,105	0,809	0,190	0,803
	1%	-3%	2%
0,15	0,903	0,096	0,900
	-11%	48%	-10%
0,17	0,910	0,089	0,907
	-12%	52%	-11%
0,20	0,918	0,082	0,915
	-13%	56%	-12%
0,28	0,931	0,068	0,929
	-14%	63%	-14%
0,30	0,933	0,066	0,932
	-14%	65%	-14%

Quadro III.19. Valores de dissipação de energia obtidos experimentalmente entre a crista do descarregador e do degrau 26, para 1.92 L/s.

Caudal [L/s]	1,92
$\frac{\Delta E}{E_m}$ (prático)	0,822
$\frac{Er}{H_{máx}}$ (prático)	0,203

Quadro III.20. Valores obtidos por cada proposta aplicada no presente caso, para diferentes factores de resistencia (f), comparativamente com os valores obtidos experimentalmente para o caudal 1,92 L/s

f	$\frac{\Delta E}{E_m}^1$	$\frac{Er}{H_{máx}}$	$\frac{\Delta E}{E_m}^2$
0,05	0,796	0,204	0,788
	3%	0%	4%
0,10	0,867	0,132	0,862
	-5%	35%	-5%
0,105	0,871	0,129	0,866
	-6%	37%	-5%
0,15	0,895	0,104	0,892
	-9%	49%	-8%
0,17	0,902	0,097	0,899
	-10%	52%	-9%
0,20	0,911	0,089	0,908
	-11%	56%	-10%
0,28	0,925	0,074	0,923
	-13%	64%	-12%
0,30	0,928	0,071	0,926
	-13%	65%	-13%

Quadro III.21. Valores de dissipação de energia obtidos experimentalmente entre a crista do descarregador e do degrau 26, para 2,19 L/s.

Caudal [L/s]	2,19
$\frac{\Delta E}{E_m}$ (prático)	0,805
$\frac{Er}{H_{m\acute{a}x}}$ (prático)	0,220

Quadro III.22. Valores obtidos por cada proposta aplicada no presente caso, para diferentes factores de resistencia (f), comparativamente com os valores obtidos experimentalmente para o caudal 2,19 L/s

f	$\frac{\Delta E}{E_m} 1$	$\frac{Er}{H_{m\acute{a}x}}$	$\frac{\Delta E}{E_m} 2$
0,05	0,778	0,222	0,768
	3%	-1%	5%
0,10	0,855	0,144	0,849
	-6%	35%	-6%
0,105	0,859	0,140	0,854
	-7%	36%	-6%
0,15	0,886	0,113	0,882
	-10%	49%	-10%
0,17	0,894	0,105	0,890
	-11%	52%	-11%
0,20	0,903	0,096	0,899
	-12%	56%	-12%
0,28	0,919	0,080	0,916
	-14%	63%	-14%
0,30	0,921	0,078	0,919
	-14%	65%	-14%

Quadro III.23. Valores de dissipação de energia obtidos experimentalmente entre a crista do descarregador e do degrau 26, para 2.29 L/s.

Caudal [L/s]	2,29
$\frac{\Delta E}{Em}$ (prático)	0,789
$\frac{Er}{H_{máx}}$ (prático)	0,243

Quadro III.24. Valores obtidos por cada proposta aplicada no presente caso, para diferentes factores de resistencia (f), comparativamente com os valores obtidos experimentalmente para o caudal 2,29 L/s

f	$\frac{\Delta E}{Em} 1$	$\frac{Er}{H_{máx}}$	$\frac{\Delta E}{Em} 2$
0,05	0,771	0,228	0,761
	2%	6%	4%
0,10	0,851	0,148	0,845
	-8%	39%	-7%
0,105	0,855	0,144	0,849
	-8%	41%	-8%
0,15	0,883	0,117	0,878
	-12%	52%	-11%
0,17	0,891	0,109	0,886
	-13%	55%	-12%
0,20	0,900	0,099	0,896
	-14%	59%	-14%
0,28	0,916	0,083	0,913
	-16%	66%	-16%
0,30	0,919	0,080	0,916
	-16%	67%	-16%