

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SANEAMENTO,
MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS

INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS
GEOMÉTRICOS E HIDRÁULICOS NA
DISTRIBUIÇÃO DE VELOCIDADES EM BACIAS
RASAS RETANGULARES

Simão Voloch Neto

Belo Horizonte

2017

**INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS GEOMÉTRICOS E
HIDRÁULICOS NA DISTRIBUIÇÃO DE
VELOCIDADES EM BACIAS RASAS
RETANGULARES**

Simão Voloch Neto

Simão Voloch Neto

**INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS GEOMÉTRICOS E
HIDRÁULICOS NA DISTRIBUIÇÃO DE
VELOCIDADES EM BACIAS RASAS
RETANGULARES**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

Área de concentração: Hidráulica Recursos Hídricos

Linha de pesquisa: Modelagem física e Matemática em Hidráulica

Orientador: Márcia Maria Lara Pinto Coelho

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG
2017

Página com as assinaturas dos membros da banca examinadora, fornecida pelo Colegiado do Programa

AGRADECIMENTOS

Agradeço inicialmente à minha orientadora, Márcia Maria Lara Pinto Coelho, sem a qual a realização deste trabalho não seria possível. Seu constante estímulo e dedicação me permitiram manter-me focado e concluir este trabalho.

Agradeço à minha esposa, Maíra Bueno Moura, pela compreensão nas noites e fins de semana em que passei sozinho trabalhando no escritório e pela ajuda nos ensaios de laboratório. Obrigado à Magali pela companhia e alegria que me passou e passa, fazendo a vida muito mais leve.

Muito obrigado aos colegas do programa de mestrado, em especial ao amigo Daniel Augusto de Miranda, a quem agradeço a forte ajuda no desenvolvimento desta pesquisa: em especial a permissão de uso do aparato experimental desenvolvido para sua tese.

RESUMO

Bacias rasas são estruturas onde a profundidade do escoamento é insignificante em relação às dimensões horizontais. Nestas o campo de velocidades governa os mecanismos de transporte e sedimentação. Deste modo, uma avaliação deste campo permite prever as zonas de sedimentação ou a presença de zonas mortas. Exemplos destas estruturas podem ser encontrados em bacias de detenção, tanques de aquicultura, algumas partes dos rios e estuários.

Este trabalho investiga a formulação de diferentes tipos de escoamentos em bacias rasas retangulares. Foi verificada a correlação entre as características geométricas e físicas das bacias (dimensões e rugosidade), as características hidráulicas do escoamento (regime de escoamento) com o tipo de formação do escoamento observado. Para simular as condições de escoamento nas bacias rasas foi utilizado o programa computacional Basement, desenvolvido pela EHTZ, em sua versão 2.5.3.

Como conclusão são propostos parâmetros de interesse no dimensionamento de bacias rasas para que estas formem tanto escoamentos simétricos como assimétricos. Verifica-se que determinados valores do *parâmetro de forma* e *taxa de expansão* da bacia também limitam a possibilidade de formação de campos de velocidades simétricos ou assimétricos para escoamentos turbulentos. Para valores de parâmetro de forma acima de 6,2, escoamentos simétricos ocorrem com menor frequência o mesmo se passa para valores de *taxa de expansão* superiores a 10.

Os cenários correspondentes ao parâmetro de forma 7,2, rugosidade n igual a 0,012 e vazões entre 0,5L/s e 3,4L/s foram simulados computacionalmente e também observados num aparato experimental montado no Centro de Pesquisas Hidráulicas da UFMG, utilizando a velocimetria de imagem em escala – LSPIV. Verificou-se semelhança no tipo de escoamento da simulação computacional e o verificado experimentalmente apenas para os escoamentos turbulentos. Recomenda-se, portanto, ampliar as verificações experimentais utilizando-se o modelo numérico como guia.

ABSTRACT

Shallow basins are structures where the flow depth is insignificant in relation to the horizontal dimensions. In these cases the velocity field governs the mechanisms of particle transport and sedimentation. Thus, an evaluation of this field allows predicting sedimentation zones, or the presence of dead zones. Examples of these structures can be found in retention basins, aquaculture tanks and some parts of rivers and estuaries.

This work investigates the formation of different kinds of rectangular shallow water flows. The correlation between geometrical and physical characteristics of these basins (dimensions and roughness), their hydraulic characteristics (flow regime), and the kind of flow observed were verified. To simulate the hydraulic conditions in the shallow basins, the software Basement, developed by ETHZ in its version 2.5.3 was used.

Finally, parameters of interest towards projecting rectangular shallow basins are proposed in order to form symmetrical or asymmetric flows. It is verified that certain values of the *shape parameter* and *expansion ratio* dictate the possibility that a symmetric or asymmetric flow field is formed. Thus, for values of *shape parameter* above 6,2 and *expansion ratio* above 10, symmetric fields rarely occur.

The scenarios corresponding to the *shape parameter* equal to 7,2, Manning roughness coefficient equal to 0,012 and flows ranging from 0,5L/s to 3,4L/s were simulated computationally and also observed in an experimental apparatus built at the Hydraulic Research Center of UFMG, using large-scale particle image velocimetry (LSPIV). It was identified a similar flow type on the computational and experimental turbulent simulations. It is recommended, therefore, to extend the experimental tests further using the numerical model as a guide.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	VI
LISTA DE TABELAS.....	VIII
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS	IX
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 OBJETIVOS.....	3
2.1 OBJETIVO GERAL	3
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
3 REVISÃO DA LITERATURA.....	4
3.1 USO DAS BACIAS RASAS RETANGULARES PARA REPRESENTAR BACIAS REAIS	4
3.2 ESTUDOS DE BACIAS RASAS	5
3.2.1 <i>Parâmetro de Forma</i>	5
3.2.2 <i>Instabilidade do fluxo em função do número de Reynolds</i>	6
3.2.3 <i>Outros efeitos</i>	8
3.2.4 <i>Estudos em modelos físicos</i>	9
3.2.5 <i>Influência do número de Froude e parâmetro de forma na conformação do escoamento</i>	12
3.2.6 <i>Análise dimensional</i>	14
3.2.7 <i>Arcabouço teórico da simulação numérica de bacias rasas</i>	15
3.3 CRITÉRIOS DE EFICIÊNCIA PARA BACIAS DE DETENÇÃO DE CHEIAS	17
3.4 CONSIDERAÇÕES A RESPEITO DA REVISÃO DA LITERATURA	17
3.4.1 <i>Equivalência entre parâmetro de forma e L/B e B/b</i>	20
4 MATERIAIS E MÉTODOS	22
4.1 SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE BACIAS RASAS	22
4.1.1 <i>Geração de nuvem de pontos</i>	22
4.1.2 <i>Geração do arquivo de geometria a partir da nuvem de pontos</i>	23
4.1.3 <i>Configuração do modelo hidráulico e simulação a partir do arquivo de geometria gerado</i>	24
4.1.4 <i>Interpretação e leitura de resultados do programa Basement</i>	25
4.1.5 <i>Verificação da influência do parâmetro de forma no campo de velocidades de bacias rasas</i>	25
4.1.6 <i>Verificação da influência de diferentes geometrias próximas às zonas de instabilidade mostradas na literatura na formação do escoamento</i>	26
4.1.7 <i>Índice de velocidade do vórtice</i>	29
4.1.8 <i>Verificação da influência de parâmetros hidráulicos não considerados na literatura</i>	30
4.2 VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL DE CENÁRIOS DE INTERESSE.....	30
4.2.1 <i>Aparato experimental de medição da velocidade superficial de bacias rasas</i>	32
4.2.2 <i>Processamento das imagens obtidas no aparato experimental</i>	33
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
5.1 INFLUÊNCIA DO PARÂMETRO DE FORMA NA CONFORMAÇÃO DO CAMPO DE VELOCIDADES	34
5.1.1 <i>Validação do modelo com dois cenários presentes na bibliografia</i>	34
5.1.2 <i>Simulação de cenários com diferentes larguras de canais de entrada e saída</i>	35
5.1.3 <i>Verificação da influência de diferentes geometrias próximas às zonas de instabilidade na formação do escoamento</i>	35
5.2 INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS HIDRÁULICOS NA CONFORMAÇÃO CAMPO DE VELOCIDADES.....	59
5.3 AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOMÉTRICOS E HIDRÁULICOS PARA ESCOAMENTOS TURBULENTOS	63
5.4 AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DOS CENÁRIOS DE INTERESSE.....	65
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	70
6.1 INFLUÊNCIA DO PARÂMETRO DE FORMA NA CONFORMAÇÃO DO CAMPO DE VELOCIDADES DE BACIAS RASAS.....	70
6.2 INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA NA CONFORMAÇÃO NO CAMPO DE VELOCIDADES DE BACIAS RASAS	71
6.3 INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS HIDRÁULICOS NA CONFORMAÇÃO NO CAMPO DE VELOCIDADES DE BACIAS RASAS.....	71
6.4 VERIFICAÇÃO EXPERIMENTAL DOS MODELOS NUMÉRICOS PARA PARÂMETRO DE FORMA 7,2	72

6.5 ESTABELECE CRITÉRIOS DE PROJETO EM FUNÇÃO DOS PARÂMETROS GEOMÉTRICOS E HIDRÁULICOS AVALIADOS	72
7 RECOMENDAÇÕES	74
REFERÊNCIAS	75
APÊNDICE I – CÓDIGO DA MACRO PARA GERAÇÃO DA NUVEM DE PONTOS DA BASE DAS BACIAS RASAS.....	79
APÊNDICE II – PARÂMETROS RESULTANTES DAS SIMULAÇÕES NUMÉRICAS.....	82

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 3.1. – Cronologia de alguns estudos sobre bacias rasas retangulares	4
FIGURA 3.2. – Diagrama indicando as variáveis geométricas da bacia retangular.	5
FIGURA 3.3. – Esquema do canal trapezoidal estudado	7
FIGURA 3.4. – Relação entre o ângulo de abertura e o número de Reynolds para formação de escoamento assimétrico e simétrico	9
FIGURA 3.5. – Relação entre os parâmetros avaliados	10
FIGURA 3.6. – Classificação dos Escoamentos	10
FIGURA 3.7. – Eficiência da remoção de sedimentos em relação à taxa de aspecto (L/B)...	11
FIGURA 3.8. – Resultados dos experimentos de Kantoush <i>et al.</i> (2007) e Dewals <i>et al.</i> (2008)	12
FIGURA 3.9. – Formação do escoamento em função do parâmetro de forma e do número de Froude.....	13
FIGURA 3.10. – Resultados qualitativos de bacias rasas reinterpretados	18
FIGURA 3.11. – Relação entre o parâmetro de forma e o tipo de escoamento.....	19
FIGURA 3.12. – Relação entre taxa de aspecto (L/B) e o tipo de escoamento	19
FIGURA 3.13. – Relação entre taxa de expansão B/b e o tipo de escoamento	20
FIGURA 3.14. – Valores de parâmetros de forma para B/b e L/B.....	21
FIGURA 4.1. – Planilha usada para a geração das coordenadas xyz	23
FIGURA 4.2. – Exemplo de utilização do <i>plugin</i> Basemesh para gerar o arquivo de geometria	23
FIGURA 4.3. – Exemplo de utilização do <i>software</i> Basement	24
FIGURA 4.4. – Exemplo de utilização do <i>plugin</i> Crayfish.....	25
FIGURA 4.5. – Fluxograma da geração do modelo hidráulico.....	25
FIGURA 4.6. – Taxas de aspecto e expansão das geometrias da bibliografia e simuladas	28
FIGURA 4.7. – Taxa de Expansão e parâmetro de forma das geometrias da bibliografia e simuladas	29
FIGURA 4.8. – Indicação do vetor de velocidades considerado para o vórtice.....	29
FIGURA 4.9. – Aparato experimental utilizado.....	31
FIGURA 4.10. – Dimensões da bacia rasa retangular existente	31
FIGURA 4.11. – Esquema do sistema hidráulico do aparato experimental.....	31
FIGURA 4.12. – Esquema do aparato de registro de imagens – LSPIV	32
FIGURA 5.1. - Comparação entre os resultados de laboratório (a, c) e do modelo computacional (b, d)	34
FIGURA 5.2. - Campos de velocidade em função do parâmetro de forma.....	36
FIGURA 5.3. - Campos de velocidade para $n=0,025$, $Q=0,80$ L/s e $b=0,125$ m	37
FIGURA 5.4. - Campos de velocidade para $n=0,025$, $Q=0,80$ L/s e $b=0,20$ m	38
FIGURA 5.5. - Campos de velocidade para $n=0,025$, $Q=0,80$ L/s e $b=0,40$ m	39
FIGURA 5.6. - Campos de velocidade para $n=0,025$, $Q=1,25$ L/s e $b=0,125$ m	40
FIGURA 5.7. - Campos de velocidade para $n=0,025$, $Q=1,25$ L/s e $b=0,20$ m	41
FIGURA 5.8. - Campos de velocidade para $n=0,025$, $Q=1,25$ L/s e $b=0,40$ m	42
FIGURA 5.9. - Campos de velocidade para $n=0,025$, $Q=3,5$ L/s e $b=0,125$ m	43
FIGURA 5.10. - Campos de velocidade para $n=0,025$, $Q=3,5$ L/s e $b=0,20$ m	44
FIGURA 5.11. - Campos de velocidade para $n=0,025$, $Q=3,5$ L/s e $b=0,40$ m	45
FIGURA 5.12. - Campos de velocidade para $n=0,070$, $Q=0,80$ L/s e $b=0,125$ m	46
FIGURA 5.13. - Campos de velocidade para $n=0,070$, $Q=0,80$ L/s e $b=0,20$ m	47
FIGURA 5.14. - Campos de velocidade para $n=0,070$, $Q=0,80$ L/s e $b=0,40$ m	48
FIGURA 5.15. - Campos de velocidade para $n=0,070$, $Q=1,25$ L/s e $b=0,125$ m	49
FIGURA 5.16. - Campos de velocidade para $n=0,070$, $Q=1,25$ L/s e $b=0,20$ m	50

FIGURA 5.17. - Campos de velocidade para $n=0,070$, $Q = 1,25$ L/s e $b=0,40$ m	51
FIGURA 5.18. - Campos de velocidade para $n=0,070$, $Q = 3,5$ L/s e $b=0,125$ m	52
FIGURA 5.19. - Campos de velocidade para $n=0,070$, $Q = 3,5$ L/s e $b=0,20$ m	53
FIGURA 5.20. - Campos de velocidade para $n=0,070$, $Q = 3,5$ L/s e $b=0,40$ m	54
FIGURA 5.21. - Padrões de escoamento em função do <i>parâmetro de forma</i>	55
FIGURA 5.22. - Padrões de escoamento em função da <i>taxa de aspecto</i>	56
FIGURA 5.23. - Padrões de escoamento em função da <i>taxa de expansão</i>	57
FIGURA 5.24. - Índice de velocidade do vórtice em função do <i>parâmetro de forma</i>	58
FIGURA 5.25. - <i>Parâmetro de forma</i> em função do número de Froude.....	58
FIGURA 5.26. - Padrões de escoamento em relação ao número de Froude	59
FIGURA 5.27. - IVV em função do número de Reynolds na bacia	60
FIGURA 5.28. - IVV em função do número de Reynolds no canal de entrada	60
FIGURA 5.29. - IVV em função do número de Froude	61
FIGURA 5.30. - Tipo de Escoamento formado em função do IVV	61
FIGURA 5.31. - Padrões de escoamento em função do tempo de detenção	62
FIGURA 5.32. - Padrões de escoamento em função do número de Reynolds na bacia.....	62
FIGURA 5.33. - Padrões de escoamento em função do número de Reynolds no canal de entrada	63
FIGURA 5.34. - Padrões de escoamento em função do <i>parâmetro de forma</i> para escoamento turbulento.....	64
FIGURA 5.35. - Padrões de escoamento em função da <i>taxa de expansão</i> para escoamento turbulento.....	64
FIGURA 5.36. - Modelo físico implantado no Centro de Pesquisas Hidráulicas	65
FIGURA 5.37. - Padrões de escoamento do modelo físico para vazão crescente de 0,5 L/s..	66
FIGURA 5.38. - Padrões de escoamento do modelo físico para vazão decrescente de 0,5 L/s	66
FIGURA 5.39. - Padrões de escoamento do modelo numérico para vazão de 0,5 L/s.....	67
FIGURA 5.40. - Padrões de escoamento do modelo físico para vazão crescente de 1,25 L/s	67
FIGURA 5.41. - Padrões de escoamento do modelo físico para vazão decrescente de 1,25 L/s	68
FIGURA 5.42. - Padrões de escoamento do modelo numérico para vazão de 1,25 L/s.....	68
FIGURA 5.43. - Padrões de escoamento do modelo físico para vazão crescente de 3,4 L/s..	69
FIGURA 5.44. - Padrões de escoamento do modelo numérico para vazão crescente de 3,4 L/s	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1. – Números de Reynolds Críticos para valores de α e <i>taxa de expansão</i>	7
Tabela 3.2. – Parâmetros dos experimentos utilizados na comparação.....	11
Tabela 4.1. – Geometrias a serem experimentadas	26
Tabela 4.2. – Geometrias para $b = 0,125\text{m}$	27
Tabela 4.3. – Geometrias para $b = 0,2\text{m}$	27
Tabela 4.4. – Geometrias para $b = 0,4\text{m}$	27
Tabela 4.5. – Correlação entre vazão e rotação do conjunto motobomba1	32
Tabela 5.1. – Frequência de ocorrência dos tipos de escoamento em função dos <i>parâmetros de forma</i>	55
Tabela 5.2. – Frequência de ocorrência dos tipos de escoamento em função do Índice de Velocidade do Vórtice (IVV)	57

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

L – Comprimento da bacia

B – Largura da bacia

b – Largura do canal de entrada

α – ângulo de abertura da bacia – no aparato experimental e nas simulações numéricas, este ângulo é 90°

IVV – Índice de Velocidade do Vórtice

LSPIV – Large Scale Particle Image Velocimetry – Técnica de em que se estima a velocidade superficial do escoamento a partir das diferenças de posições de partículas em uma série de fotografias.

VMLB – Velocidade média longitudinal da bacia – velocidade média calculada pela equação da continuidade na parte mais larga da bacia

Rh – Raio Hidráulico – Propriedade hidráulica equivalente à razão entre a área molhada e o perímetro molhado

1 INTRODUÇÃO

Bacias rasas são, segundo Chu *et al.* (2004), estruturas em que a profundidade do escoamento é insignificante em relação às dimensões horizontais. Jirka e Uijtewaal (2004) definem escoamentos rasos como escoamentos turbulentos, majoritariamente unidirecionais e gerados por gradiente piezométrico. Exemplos de bacias rasas são encontrados em algumas partes dos rios e estuários (CHU *et al.*, 2004), em tanques de aquicultura (OCA *et al.*, 2004) e bacias de detenção (LOPEZ *et al.*, 2008).

Segundo Camnasio *et al.* (2011), o campo das velocidades governa os mecanismos de transporte e sedimentação nessas estruturas hidráulicas. Assim, uma avaliação mais precisa desse campo permite prever as zonas de sedimentação ou a presença de zonas mortas, locais preferenciais para a proliferação de algas. Ademais, o padrão das linhas de fluxo afetam o tempo de detenção e consequentemente a eficiência das lagoas de detenção, *wetlands* e de áreas contendo material dragado.

Entre 2000 e 2016, diversos estudos foram realizados contemplando as características do escoamento de bacias rasas retangulares tanto em laboratório quanto em modelos computacionais, dentre eles destacam-se os estudos de Dufresne (2008), Kantoush (2009) e Camnasio (2012).

Também foram relatadas, independentemente, situações de instabilidade da distribuição de velocidades por Mizushima e Shiotani (2001) e por Dufresne *et al.* (2011). Estas instabilidades se caracterizam por oscilações entre distribuições de velocidades simétricas e assimétricas, de maneira permanente ou não, para determinadas condições de contorno. Estas oscilações são de grande interesse por caracterizarem uma alteração do comportamento do campo de velocidades da bacia.

As instabilidades de distribuição de velocidades ocorrem em função de configurações geométricas específicas das bacias estudadas - largura do canal de entrada e comprimento e largura da bacia. O trabalho de Mizushima e Shiotani (2001) identifica a distribuição de velocidades em função do número de Reynolds do escoamento e da relação entre o comprimento e largura da bacia estudada, sem considerar as dimensões do canal de entrada. Da mesma maneira, Camnasio (2012) considerou apenas a relação entre comprimento e largura da bacia. Já Dufresne *et al.* (2011), indicam um *parâmetro de forma*, calculado a partir

da largura, comprimento da bacia e largura do canal de entrada das bacias rasas como parâmetro indicador de sua geometria.

Este trabalho procura conciliar as abordagens propostas por Dufresne *et al.* (2011) e Mizushima e Shiotani (2001), além de verificar a influência de uma série de fatores desconsiderados pelo último: rugosidade de fundo do canal e diferentes configurações de altura de água e vazões. Para esta avaliação é utilizado o *software* Basement, em sua versão 2.5.3, desenvolvido por ETHZ (2015). O modelo utiliza as premissas de escoamento bidimensional para calcular as variáveis hidráulicas do escoamento. Adicionalmente, configurações de bacias de interesse são testadas em modelo físico, no Centro de Pesquisas Hidráulicas da UFMG, para verificação da distribuição de velocidade.

Os estudos desenvolvidos por Dufresne *et al.* (2011) e Mizushima e Shiotani (2001) têm foco na análise sedimentológica e matemática e não exploraram a gama de configurações geométricas que este trabalho pretende observar.

Espera-se que os resultados desse trabalho permitam conhecer a complexa interação entre as linhas de fluxo, geradas em função dos parâmetros geométricos da bacia e das características do escoamento avaliados. Diante destes resultados, espera-se também poder estabelecer critérios de projeto para bacias pouco profundas. Esses critérios deverão levar em conta os objetivos pretendidos para a bacia, quais sejam:

- Favorecer a sedimentação, como nos reservatórios de sedimentação ou evitá-la como nos reservatórios de geração de energia elétrica, controle de cheias, etc;
- Evitar zonas mortas, aplicáveis em tanques de aquicultura ou de tratamento de água;
- Estabelecimento dos tempos de detenção preponderantes, em função dos parâmetros geométricos e hidráulicos avaliados, aplicáveis em tanques de tratamento de água e esgoto.

2 OBJETIVOS

2.1 *Objetivo geral*

O objetivo desta pesquisa é, em linhas gerais, avaliar a influência das condições hidráulicas e características geométricas sobre o comportamento das distribuições de velocidades em bacias rasas retangulares. De modo a atingir este objetivo será utilizado, preponderantemente, um método computacional bidimensional, em que diversas configurações geométricas de bacias rasas serão testadas. Adicionalmente algumas configurações de bacias rasas serão observadas em modelo físico e comparadas com o modelo numérico.

2.2 *Objetivos específicos*

Os objetivos específicos são:

- **Avaliar a influência das características geométricas da bacia no comportamento do fluxo**

Este estudo procura verificar, utilizando-se modelo numérico, a influência da variação do “*parâmetro de forma*” e da relação entre largura e comprimento do canal para a formação dos vetores de velocidade. Especial interesse é dedicado às condições limite entre escoamento simétrico e assimétrico,

- **Avaliar a influência de fatores hidráulicos na distribuição de velocidades**

De maneira a complementar o que já foi explorado na bibliografia, uma análise da influência de alguns parâmetros é feita utilizando-se um modelo numérico, de modo a verificar a correlação destes na configuração do campo de velocidades formado.

Os parâmetros a serem analisados são a profundidade do escoamento e a rugosidade do fundo da bacia – parâmetros estes cuja variabilidade não tem registro na bibliografia referenciada,

- **Estabelecer critérios de projeto em função dos parâmetros geométricos e hidráulicos avaliados**

Uma vez cumpridos os objetivos anteriores, procurar-se-á sintetizar a massa de dados gerados de modo a subsidiar os projetos de bacias rasas retangulares no que tange à conformação do escoamento. Deste modo serão estabelecidos limites geométricos e hidráulicos que levam a diferentes tipos de campos de velocidades.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 *Uso das bacias rasas retangulares para representar bacias reais*

O uso das bacias rasas retangulares como forma de se representar bacias reais é recorrente na literatura. De fato, o trabalho de Oca (2004) remete ao uso das bacias retangulares na aquicultura, enquanto as teses de Khantoush (2008), Camnasio (2011) e Dufresne (2009) tratam dos aspectos hidráulicos e sedimentológicos das bacias rasas retangulares.

Na FIGURA 3.1 é representado, cronologicamente, o desenvolvimento de alguns dos estudos de destaque sobre bacias rasas utilizados neste trabalho.

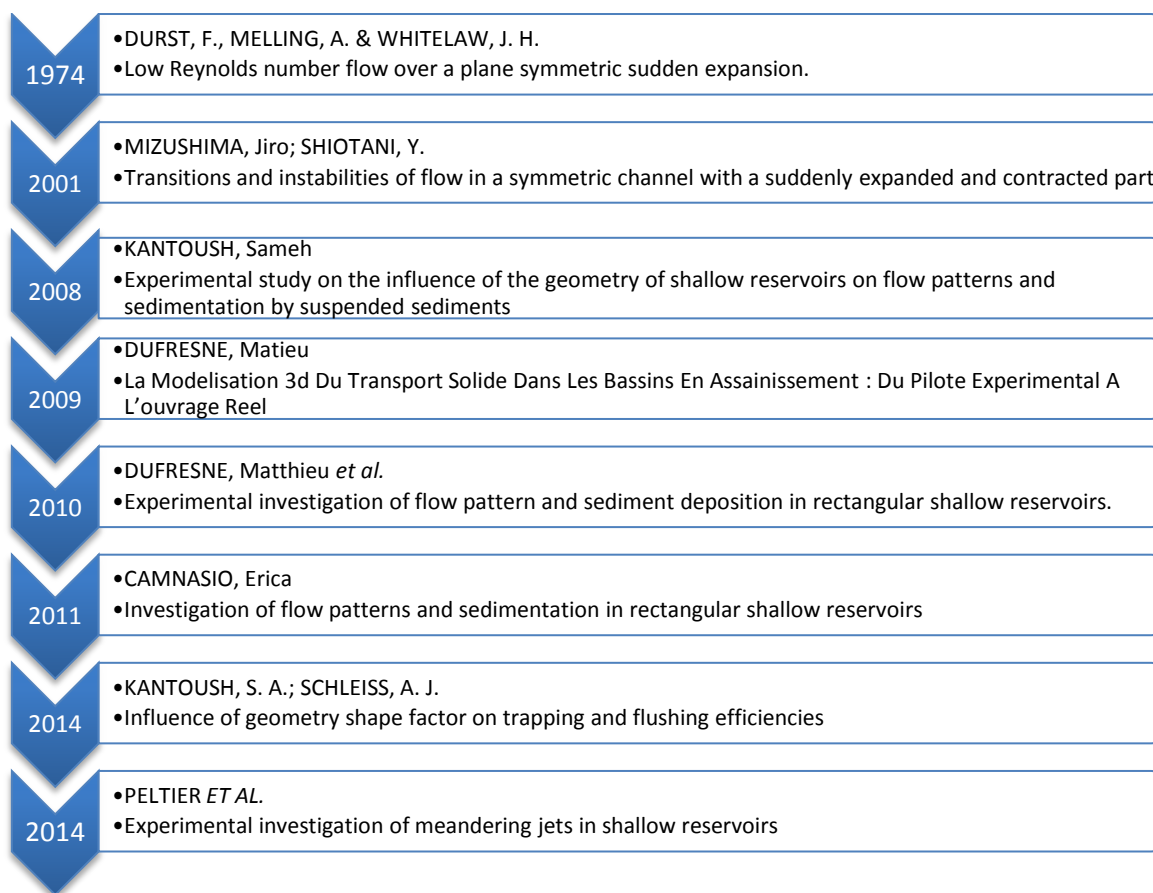


FIGURA 3.1. – Cronologia de alguns estudos sobre bacias rasas retangulares

Observa-se que, embora os trabalhos anteriores tenham feito importantes contribuições para o estudo sedimentológico, algumas questões ainda precisam ser esclarecidas, tais como a influência da rugosidade do leito de fundo das bacias e a influência das larguras dos canais de entrada e saída no comportamento do escoamento.

3.2 Estudos de Bacias Rasas

3.2.1 Parâmetro de Forma

O *parâmetro de forma* foi proposto por Dufresne *et al.* (2011) na formação de escoamentos assimétricos a partir de observações de laboratório com profundidade acima de 20cm, rugosidade de Manning abaixo de 0,003 e escoamento turbulento e subcrítico.

Segundo Dufresne *et al.* (2011) o *parâmetro de forma* é definido pela seguinte expressão:

$$\text{Parâmetro de forma} = \frac{L}{\Delta B^{0,60} b^{0,40}} \quad (3.1)$$

Em que L é o comprimento da bacia, b é a largura do canal de entrada, de seção retangular, e ΔB é a metade do complemento entre b e a largura total do canal. Estas relações são mostradas na FIGURA 3.2.

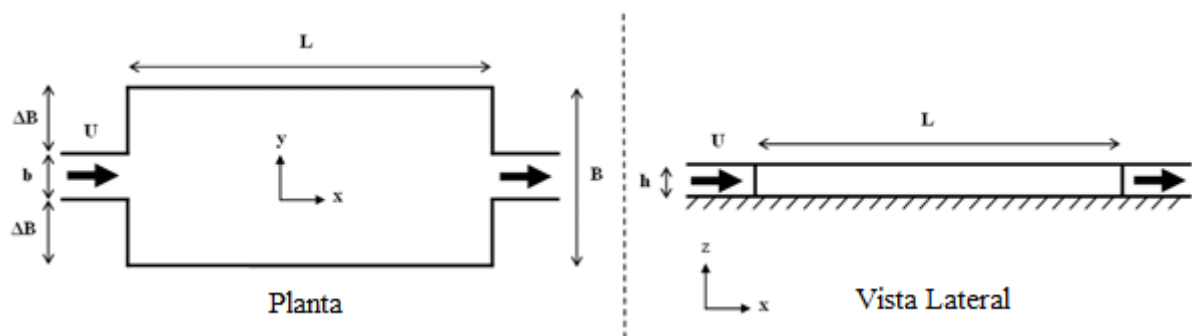


FIGURA 3.2. – Diagrama indicando as variáveis geométricas da bacia retangular.
Fonte: DUFRESNE, 2011.

No trabalho experimental realizado por Dufresne *et al.* (2010) foram observadas flutuações não periódicas entre escoamentos simétricos e assimétricos para valores do *parâmetro de forma* entre 6,2 e 6,8. Em outras palavras, para determinadas dimensões da bacia, observou-se a alternância entre escoamento simétrico (um ou mais vórtices espelhados em relação à linha de fluxo principal) e assimétrico (vórtices diferentes em relação à linha de fluxo principal ou um grande vórtice que engloba toda a bacia) que não se repetiram em intervalos determinados.

Estas flutuações são de grande interesse nas questões relacionadas ao transporte de sedimentos, pois indicam que a mudança na largura do canal de entrada pode alterar

significativamente a configuração do escoamento e o padrão de deposição de sedimentos na bacia. Esta observação permite aos autores prospectar a aplicação do conceito dos parâmetros de forma apropriados para bacias de sedimentação e para bacias de retenção de água, permitindo em uma configuração, a retenção de sedimentos, e em outra, sua remoção.

3.2.2 Instabilidade do fluxo em função do número de Reynolds

O número de Reynolds corresponde, segundo Potter e Wiggert (2004), a razão entre as forças inerciais e viscosas. O número de Reynolds é definido como:

$$Re = \frac{v\rho l}{\mu} = \frac{vl}{\nu} \quad (3.2)$$

Em que:

Re é o número de Reynolds;

V é a velocidade característica em m/s;

ρ é a massa específica em kg/m³;

l é o comprimento específico em m;

μ é a viscosidade dinâmica em kg/m s;

ν é a viscosidade cinemática em s/m².

Segundo Vianna (2001), ao se supor como comprimento característico o raio hidráulico (razão entre área molhada e perímetro molhado), o escoamento é considerado laminar para valores de Reynolds até 500 e turbulento para valores de Reynolds acima de 1000.

Shapira *et al.* (1989) avaliaram numericamente o comportamento de diversas configurações geométricas em função da geometria de um canal trapezoidal como indicado na FIGURA 3.3.

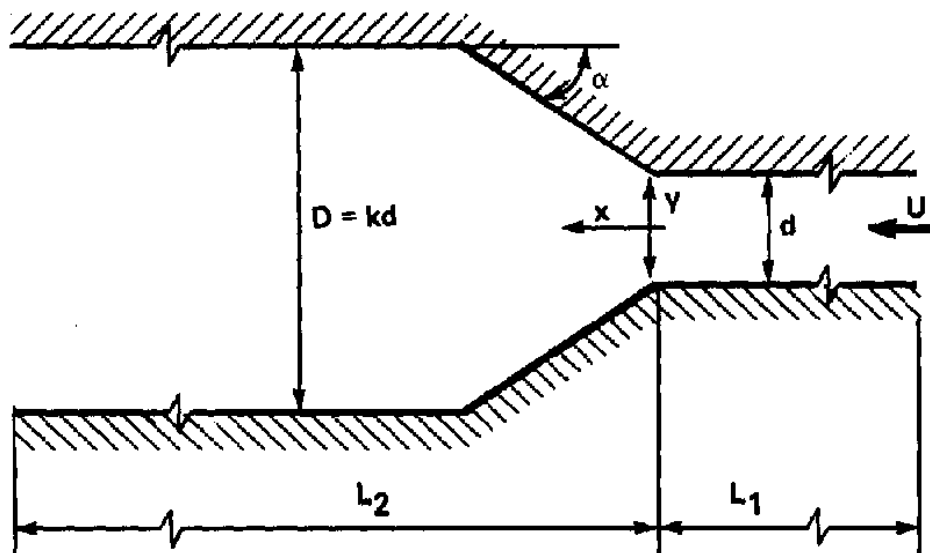


FIGURA 3.3. – Esquema do canal trapezoidal estudado
 Fonte: SHAPIRA *et al.* 1989.

No estudo de Shapira *et al.* (1989) foi proposta a existência de número de Reynolds crítico no canal de entrada (Re_{cr}) tal que para valores superiores a Re_{cr} , a configuração do escoamento se torna assimétrica. Na Tabela 3.1 são mostrados os diferentes valores de Re_{cr} para cada valor do ângulo α e da taxa de expansão (razão entre largura do canal de entrada e da bacia) encontrados no estudo.

Tabela 3.1. – Números de Reynolds Críticos para valores de α e taxa de expansão

1:3		1:2	
α	Re_{cr}	α	Re_{cr}
10°	147	10°	305
15°	117		
26,56°	99	26,56°	247
45°	95		
63,43°	86		
90°	82	90°	215

Observa-se que os valores de número de Reynolds críticos necessários para a formação de ângulos assimétricos diminuem na medida em que o ângulo α aumenta. Todos os valores do número de Reynolds referem-se a escoamentos laminares, por serem inferiores a 500.

3.2.3 Outros efeitos

De acordo com Camnasio (2012) a formação de escoamentos assimétricos é devida ao efeito Coanda.

Kantoush (2008) identifica o efeito Coanda como o causador dos vórtices e acrescenta que o equilíbrio entre a componente centrífuga da aceleração e a baixa pressão formada na parte externa do vórtice tende a definir um estado permanente de conformação do escoamento na bacia. Segundo o mesmo autor, a formação dos vórtices envolve os seguintes mecanismos:

- O formato curvo do jato é acompanhado da redução da pressão da parte externa do mesmo: Quando a expansão do canal de entrada para a bacia ocorre, a pressão do jato próximo à parede é reduzida em relação à pressão em torno do jato resultando no "ligamento" deste junto à parede;
- A redução da pressão na parte externa do vórtice aumenta seu tamanho comparado com aquele do outro lado da bacia - ambos controlam a parte central do fluxo;
- De modo simultâneo, um aumento do tamanho é acompanhado do aumento da aceleração axial da velocidade e das forças centrífugas, que tende a reestabelecer a simetria dos padrões de escoamento;
- O equilíbrio entre estes efeitos (redução da pressão na parte externa do vórtice e aumento da força centrífuga) é alcançado na conformação permanente do escoamento.

Allery *et al.* (2004) estudaram o fenômeno de formação de escoamentos assimétricos de ar para fins acústicos - redução da formação de tons autossustentáveis. O fenômeno de formação de escoamento assimétrico e de retorno ao simétrico apresenta histerese, isto é, característica da formação do escoamento assimétrico a partir do simétrico difere da característica do escoamento simétrico a partir de assimétrico

Os resultados da pesquisa apontam para uma correlação entre o ângulo de abertura e o número de Reynolds para o qual ocorre a formação de escoamento assimétrico, e simétrico, como mostra a FIGURA 3.4. Nesta figura, também se observa a concordância dos resultados experimentais (símbolos ocios) e numéricos (símbolos cheios).

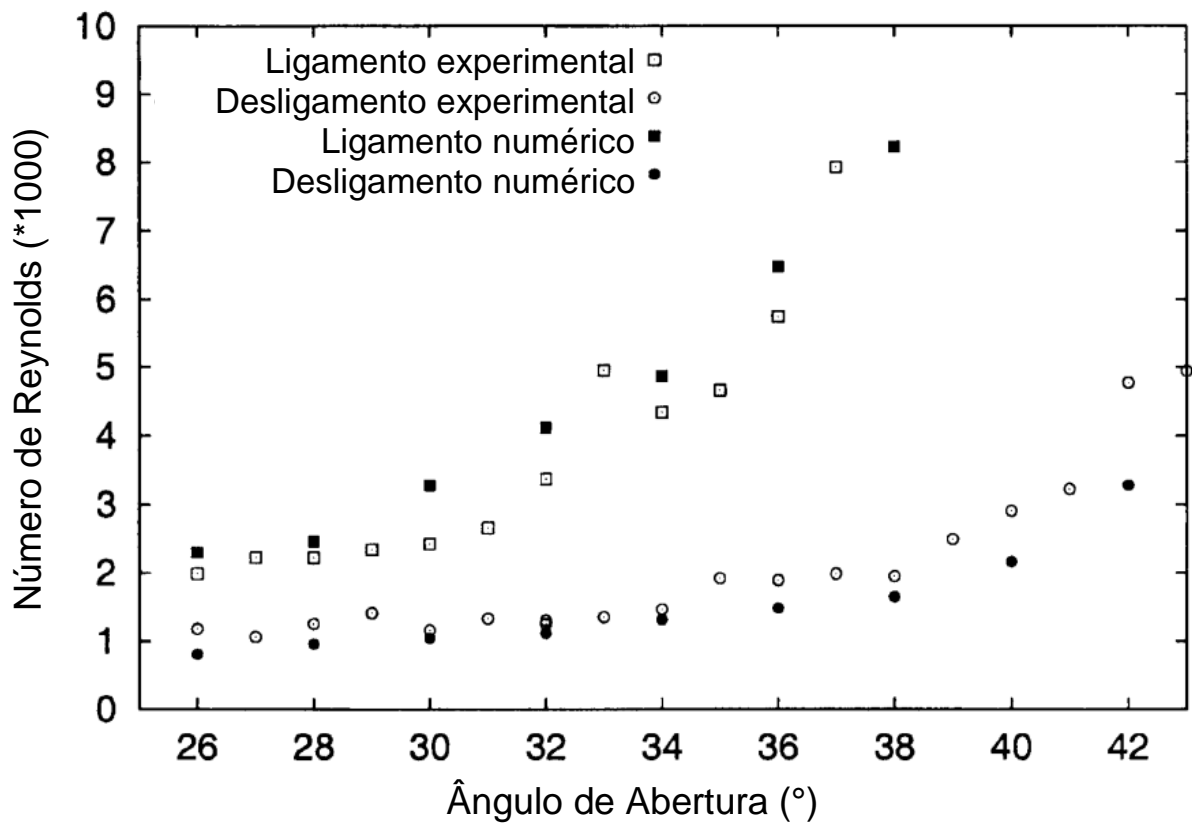


FIGURA 3.4.– Relação entre o ângulo de abertura e o número de Reynolds para formação de escoamento assimétrico e simétrico

Fonte: adaptado de ALLERY *et al.*, 2004

Observa-se que para maiores valores de ângulo de abertura a diferença entre o número de Reynolds a partir do qual ocorre a formação de ligamento e desligamento aumenta. A presente pesquisa pretende verificar se este mesmo fenômeno se aplica a um fluido incompressível – a água.

3.2.4 Estudos em modelos físicos

Diversos ensaios realizados em laboratório referentes a bacias rasas já tiveram seus resultados publicados. Entre eles se destacam os ensaios elaborados por CAMNASIO *et al.* (2011) e NOVAK *et al.* (2012). Os resultados dos trabalhos de CAMNASIO (2012) e DUFRESNE *et al.* (2011), realizados na Escola Politécnica Federal de Lausanne (EPFL) e na Universidade de Liège (ULg) respectivamente, são exibidos na FIGURA 3.5. Nesta figura os resultados são classificados em assimétricos (A1, A2), simétricos (S0, S1) e de canal (CH-L).

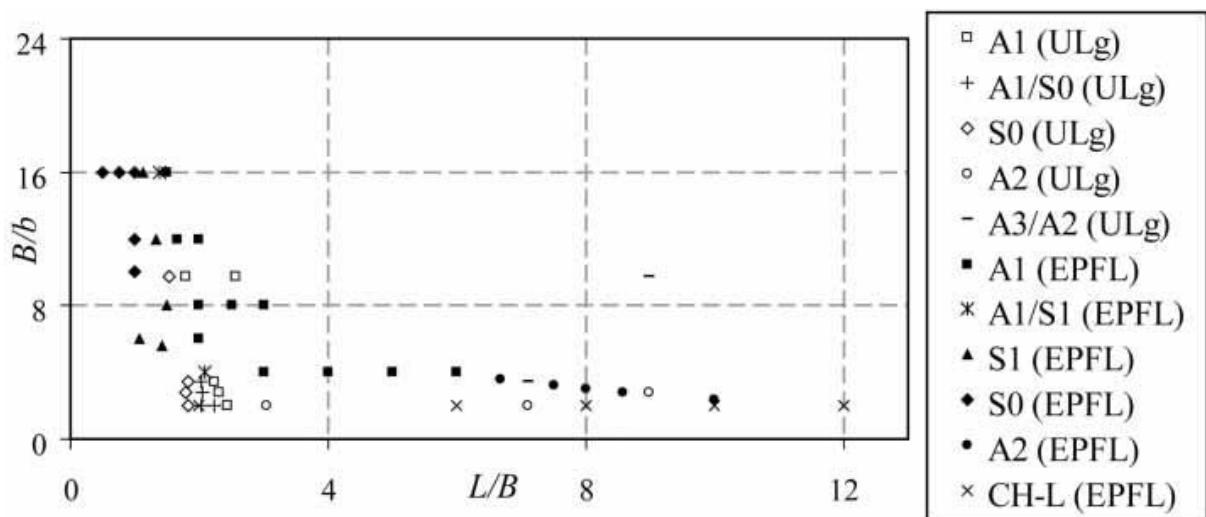


FIGURA 3.5.– Relação entre os parâmetros avaliados
 Fonte: CAMNASIO *et al.*, 2011

Na FIGURA 3.5 se encontram as geometrias testadas em relação aos parâmetros adimensionais: *taxa de aspecto*, do inglês *Aspect Ratio* - L/B (comprimento por largura da bacia) e *taxa de expansão*, do inglês *Expansion Ratio* - B/b (largura da bacia em relação ao canal de entrada). Os tipos de escoamento observados são listados na FIGURA 3.6.

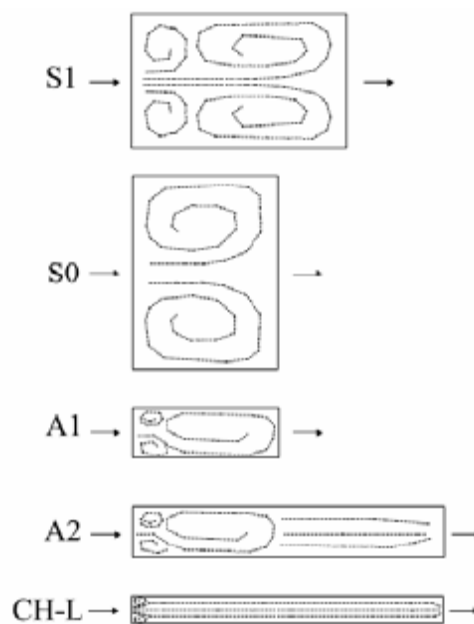


FIGURA 3.6. – Classificação dos Escoamentos

Fonte: CAMNASIO, 2012

A classificação mostrada na FIGURA 3.6 compreende os escoamentos simétricos com quatro e dois vórtices (S1 e S0), assimétricos (A1 e A2) e como canal (CH-L).

Kantoush e Schleiss (2014) avaliaram a eficiência da retenção de sedimentos ($d_{50}=50\mu\text{m}$) para diversos valores de *taxa de aspecto* (L/B). Os valores de eficiência de retenção, para cada tempo de simulação, são mostrados na FIGURA 3.7.

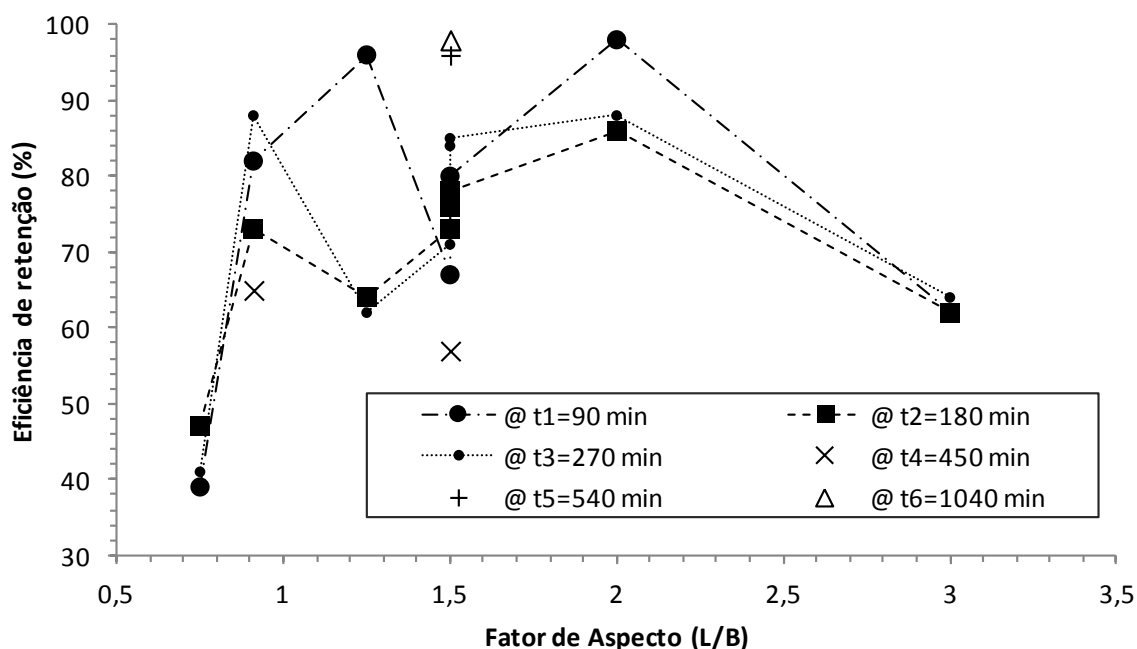


FIGURA 3.7. – Eficiência da remoção de sedimentos em relação à *taxa de aspecto* (L/B)
 Fonte: Adaptado de KANTOUSH E SCHLEISS, 2014

Na FIGURA 3.7 observa-se uma redução da eficiência para valores de *taxa de aspecto* próximos a 1,5 quando comparado aos mais próximos, supostamente pela conformação do campo de velocidades ser diferente para esta condição.

Dewals *et al.* (2008), e Kantoush *et al.* (2007) realizaram estudos em laboratório para diferentes parâmetros de largura e comprimento envolvendo bacias rasas retangulares. Na Tabela 3.2 se encontram resumidos os parâmetros dos experimentos usados nos trabalhos citados.

Tabela 3.2. – Parâmetros dos experimentos utilizados na comparação

Número do Teste	L	B	L/B	B/b	b	Δb	Parâmetro de forma	Fonte
1	6	4	1,5	16	0,25	1,875	7,2	Kantoush <i>et al.</i>
2	5	4	1,25	16	0,25	1,875	6,0	Dewals <i>et al.</i>

Tanto Kantoush *et al.* (2007) quanto Dewals *et al.* (2008) testaram diversas vazões e diferentes geometrias - relações entre comprimento pela largura da bacia e entre esta e a largura do canal de entrada - com o intuito de estudar padrões de deposição de sedimentos e a instabilidade dos escoamentos em bacias rasas. Para a execução de seus trabalhos, ambos utilizaram a técnica PIV – *Particle Image Velocimetry*. Nela, uma câmera digital é colocada acima do aparato experimental e diversos elementos flutuantes no escoamento. Utilizou-se um programa de computador para calcular a direção do fluxo superficial em cada momento da simulação a partir das posições dos flutuadores.

O trabalho de Kantoush *et al.* (2007) contém os vetores de velocidades mostrados na FIGURA 3.8 (esquerda) onde se observou formação de um escoamento assimétrico com um desvio do fluxo principal para a direção sul e um vórtice na região norte, para o *parâmetro de forma* igual a 7,2.

É importante frisar que, segundo Kantoush (2008), o escoamento assimétrico com duas células de recirculação ou menos reduz a retenção de sedimentos.

O resultado obtido por Dewals *et al.* (2008) se refere ao *parâmetro de forma* de 6,0 e é mostrado na FIGURA 3.8 (direita), onde se observa a formação de dois vórtices simétricos nas regiões norte e sul do experimento.

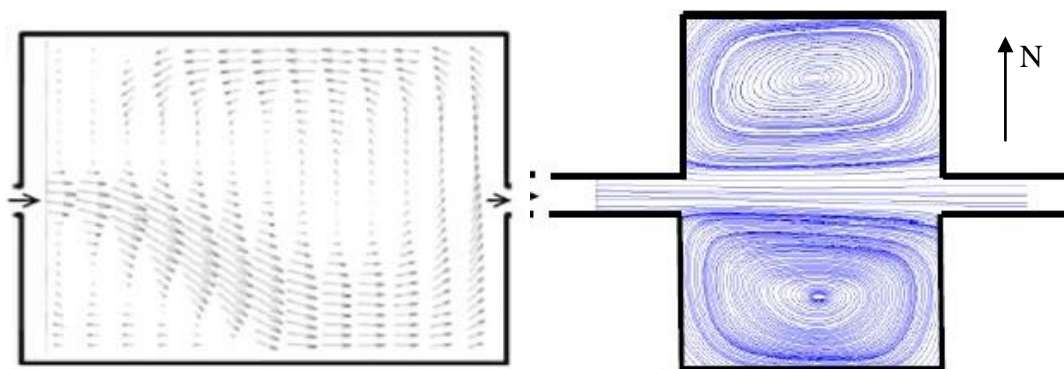


FIGURA 3.8. – Resultados dos experimentos de Kantoush *et al.* (2007) e Dewals *et al.* (2008)

3.2.5 Influência do número de Froude e *parâmetro de forma* na conformação do escoamento

O número de Froude é a razão entre a força de inércia e da gravidade, de acordo com Porto (2006). A seguinte equação sumariza esta relação:

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g y_h}} \quad (3.3)$$

Na qual:

Fr é o número de Froude

V é a velocidade característica;

g é a aceleração da gravidade;

y_h é a profundidade hidráulica.

Para valores de número de Froude acima de 1, o escoamento é considerado supercrítico – as forças de inércia superam as forças gravitacionais. Para valores de número de Froude inferior a 1 o escoamento é chamado subcrítico e para valores de número de Froude igual a 1 o escoamento é considerado crítico – as forças inerciais se igualam às gravitacionais.

Segundo Peltier *et al.* (2014), o número de Froude e o *parâmetro de forma* podem ser usados para definir o tipo de escoamento formado. Ao comparar seus próprios experimentos aos de outros autores da bibliografia, notou-se uma tendência de formação de escoamentos assimétricos para valores de *parâmetro de forma* acima de 6,2 e de valores simétricos para valores de Froude abaixo de 0,21 e *parâmetro de forma* abaixo de 6,2. Na FIGURA 3.9 é destacada esta mudança de formação de escoamento em função destes parâmetros.

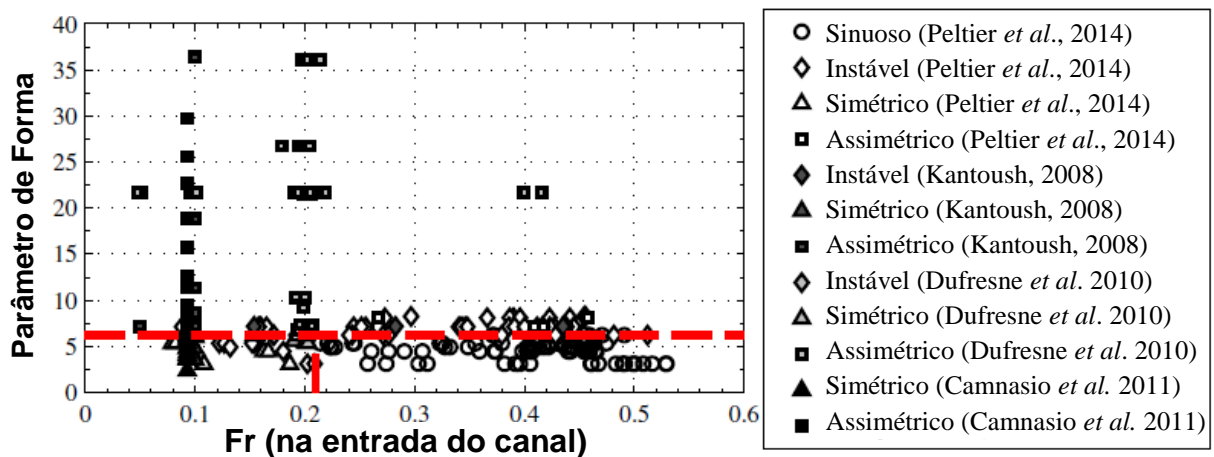


FIGURA 3.9. – Formação do escoamento em função do *parâmetro de forma* e do número de Froude

Fonte: Adaptado de PELTIER *et al.* (2014)

3.2.6 Análise dimensional

Peltier *et al.* (2014) utilizaram a técnica de análise dimensional proposta por Buckingham (1915) para escolher as variáveis importantes na caracterização do fenômeno observado nos escoamentos de bacias rasas. Em seu estudo as seguintes variáveis foram consideradas representativas:

- Comprimento do reservatório – L;
- Largura da expansão lateral – ΔB ;
- Largura dos canais de entrada e saída - b;
- Declividade longitudinal da bacia - S_0 ;
- Vazão – Q;
- Velocidade – v;
- Profundidade do escoamento - h;
- Rugosidade – ε ;
- Frequência característica de formação do vórtice – f;
- Comprimento longitudinal característico do vórtice - Λ_x ;
- Comprimento transversal característico do vórtice - Λ_y ;
- Aceleração da gravidade – g;
- Massa específica – ρ ;
- Viscosidade dinâmica – μ ;
- Tensão superficial – σ .

A partir das variáveis listadas anteriormente e das unidades fundamentais (massa, comprimento e tempo), os seguintes parâmetros adimensionais foram calculados:

- $\pi_1 = h/L \times \pi_2^{-1} = \Delta B/L$
- $\pi_2 = h/\Delta B$
- $\pi_3 = b/h \times \pi_2 = b/\Delta B$
- $\pi_4 = S_0$
- $\pi_5 = \varepsilon/h$
- $\pi_6 = \frac{\varepsilon}{h}, \pi_6 = \frac{f h^2}{v} \times \pi_3 \pi_2^{-1} = f \frac{L}{v} = S_t$ (número de Strouhal)
- $\pi_7 = \Lambda_x/h$
- $\pi_8 = \Lambda_y/h$

- $\pi_9 = \sqrt{Q^2/(gh^5)} \times \pi_3^{-2} \pi_2^2 = \sqrt{Q^2/(gh^5)} \times (b/\Delta B)^{-2} (H/\Delta B)^2 = \sqrt{Q^2/(b^2 gh^3)} = \sqrt{(v/bh)^2/(b^2 gh^3)} = \frac{v}{\sqrt{gh}} = Fr$ (número de Froude)
- $\pi_{10} = \rho V b / \mu \times R h / b = Re$ (número de Reynolds)
- $\pi_{11} = \frac{\rho V^2 b^2}{\sigma h} \times \pi_3^{-2} \pi_2^2 = \rho V^2 h / \sigma = W$ (número de Weber)

Destacam-se entre os parâmetros adimensionais calculados por Peltier (2014) os números de Strouhal, Froude, Reynolds e Weber. Estes números representam, segundo Potter e Wiggert (2004) as relações entre as forças centrífuga e inercial, inercial e gravitacional, inercial e viscosa e inercial e de tensão superficial, respectivamente. Em sua pesquisa, Peltier (2014), verificou que apenas o número de Froude e o *parâmetro de forma* (este último não se encontra entre os π deduzidos) possuem correlação com o tipo de escoamento formado.

3.2.7 Arcabouço teórico da simulação numérica de bacias rasas

Segundo ETHZ (2015), modelos matemáticos do tipo “bacias rasas” são usados para representar uma grande variedade de fenômenos físicos. Por questões de simplicidade, as equações de águas rasas serão daqui em diante chamadas de EAR. Estas representam uma importante classe de problemas de interesse prático que envolvem escoamentos de superfície livre sob a influência da gravidade. Importantes aplicações podem ser encontradas nos estudos das ondas oceânicas, ondas de cheia em rio e ondas de cheia causada por rompimento de barragem.

A validade das EAR implica na adoção das seguintes premissas e condições:

- Distribuição hidrostática de pressões: isto ocorre quando as acelerações verticais são desprezíveis;
- Pequena inclinação do canal de fundo, de modo que o cosseno do ângulo entre o fundo do canal e a horizontal seja próximo da unidade;
- As leis de resistência ao escoamento vigentes em regime permanente se aplicam ao escoamento em regime variado.

Os pressupostos destacados acima fazem parte das hipóteses estabelecidas no *software* Basement (ETH, 2015) utilizado neste trabalho. Isto permite uma integração das equações ao

longo da profundidade do escoamento, que resulta num conjunto de equações não lineares, chamadas de equações de águas rasas. Estas equações formam um sistema bidimensional de equações diferenciais parciais do tipo hiperbólico. A abordagem utilizada para a derivação das equações em águas rasas fundamenta-se na integração das equações tridimensionais de Navier-Stokes ao longo da profundidade.

Diversas simplificações das equações de conservação de massa e da quantidade de movimento são realizadas de acordo as premissas citadas anteriormente, levando a equações de águas rasas, apresentadas a seguir.

Equações de águas rasas

De acordo com ETHZ (2015), as equações de águas rasas (EAR) tomam a seguinte forma:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{u}h)}{\partial x} + \frac{\partial(\bar{v}h)}{\partial y} = 0 \quad (3.4)$$

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + g \frac{\partial h}{\partial x} = -g \frac{\partial z_b}{\partial x} - \frac{1}{\rho h} \tau_{Bx} + \frac{1}{\rho h} \frac{\partial [h(\bar{\tau}_{xx} + D_{xx})]}{\partial x} + \frac{1}{\rho h} \frac{\partial [h(\bar{\tau}_{xy} + D_{xy})]}{\partial y} \quad (3.5)$$

$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + g \frac{\partial h}{\partial y} = -g \frac{\partial z_b}{\partial y} - \frac{1}{\rho h} \tau_{By} + \frac{1}{\rho h} \frac{\partial [h(\bar{\tau}_{yx} + D_{yx})]}{\partial x} + \frac{1}{\rho h} \frac{\partial [h(\bar{\tau}_{yy} + D_{yy})]}{\partial y} \quad (3.6)$$

Em que:

h é a profundidade hidráulica em m;

g é a aceleração da gravidade em m/s²;

\bar{u} é a velocidade média ao longo da profundidade na direção x em m/s;

\bar{v} é a velocidade média ao longo da profundidade na direção y em m/s;

z_b é a elevação do fundo da bacia em m;

ρ é a massa específica do fluido em N/m³;

τ_{Bx}, τ_{By} são as tensões cisalhantes no fundo do canal nas direções x e y em N/m²;

$\bar{\tau}_{xx}, \bar{\tau}_{xy}, \bar{\tau}_{yx}, \bar{\tau}_{yy}$ são os esforços turbulentos e viscosos em N/m²;

$D_{xx}, D_{xy}, D_{yx}, D_{yy}$ são os termos de dispersão de momento em N/m².

Os esforços turbulentos e viscosos são calculados pela equação de Boussinesq relativa à viscosidade de vórtice.

3.3 Critérios de eficiência para bacias de retenção de cheias

A retenção de águas pluviais é, segundo Gribbin (2012), o armazenamento temporário de parte das águas de chuva para posterior liberação controlada. Esta ação tem por objetivo limitar a vazão a montante de uma área ocupada e abrandar os efeitos destrutivos (de erosão) do escoamento. Objetivos secundários incluem o controle de qualidade da água (retendo partículas poluentes sólidas e em suspensão) e a recarga de aquíferos -ao se manter um gradiente hidráulico para a infiltração de água no solo.

Jansons e Law (2007) expõem os seguintes índices para a eficiência de bacia de retenção de cheias:

$$\lambda = \frac{t_p}{t_n} \quad (3.7)$$

Em que λ é a eficiência hidráulica do sistema de retenção de águas pluviais, t_p é o tempo que o pulso de cheia leva para atravessar a bacia e t_n é o tempo nominal de retenção da bacia, calculado pela razão entre seu volume e a vazão afluente. Quanto mais próximo de 1, maior a eficiência da dissipação de cheias. Outro índice de eficiência é o índice de curto-circuito:

$$S = \frac{t_{16}}{t_{50}} \quad (3.8)$$

Em que S é o índice de curto-circuito, t_{16} é o tempo para que 16% dos marcadores passem pela bacia e t_{50} é o tempo para que 50% dos marcadores passem pela bacia. Quanto menor o índice de curto-circuito, melhor a eficiência de dissipação de cheias da bacia.

3.4 Considerações a Respeito da Revisão da Literatura

Ao se reconstruir a figura de Camnasio *et al.* (2011), (FIGURA 3.5), e representar as formações simétricas de vermelho, e assimétricas em azul, obtém-se a seguinte FIGURA 3.10.

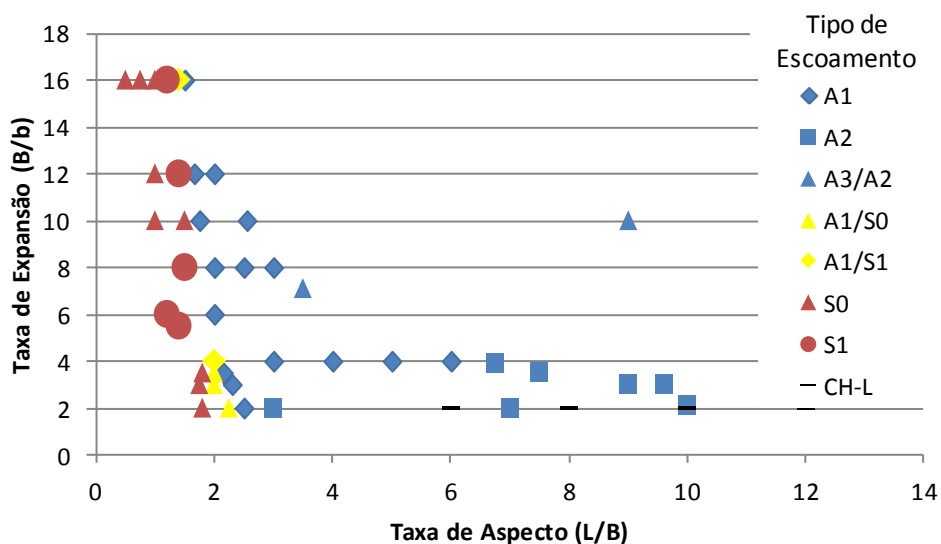


FIGURA 3.10. – Resultados qualitativos de bacias rasas reinterpretados
 Fonte: adaptado de CAMNASIO *et al.* (2011)

Na FIGURA 3.10 é possível observar que a transição entre um campo de velocidade simétrico e assimétrico se dá próximo à relação entre *taxa de aspecto* (L/B) igual a 2.

A partir das relações entre comprimento da bacia e sua largura - L/B e da relação entre largura da bacia e do canal de entrada - B/b. É possível deduzir, como mostrado no item 3.4.1, o *parâmetro de forma* para cada um dos pontos da FIGURA 3.10. A relação entre o *parâmetro de forma* e o escoamento formado é mostrada na FIGURA 3.11.

Na FIGURA 3.11, percebe-se que a transição entre escoamentos simétricos e assimétricos ocorre para valores de *parâmetro de forma* entre 4 e 5.

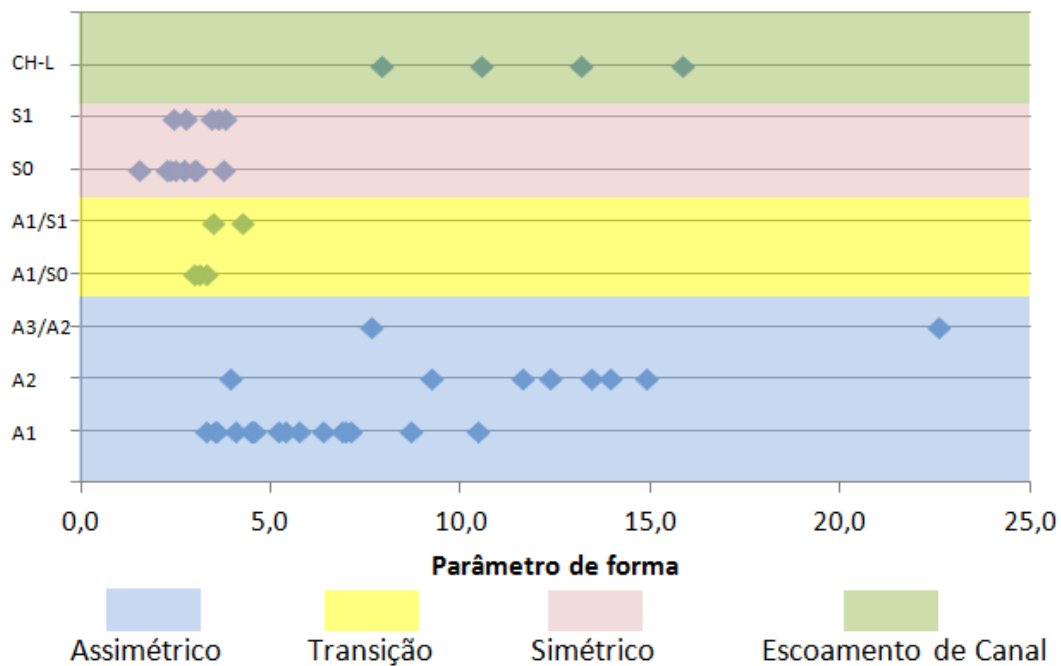


FIGURA 3.11. – Relação entre o *parâmetro de forma* e o tipo de escoamento
 Fonte: adaptado de CAMNASIO *et al.* (2011)

De maneira similar ao *parâmetro de forma*, a *taxa de aspecto* (L/B) e o tipo de escoamento são mostrados na FIGURA 3.12. É confirmado que a transição entre o escoamento simétrico e assimétrico ocorre para valores de L/B próximos de 2. Contudo, devido à escassez de dados, um maior refinamento desta faixa se faz necessário.

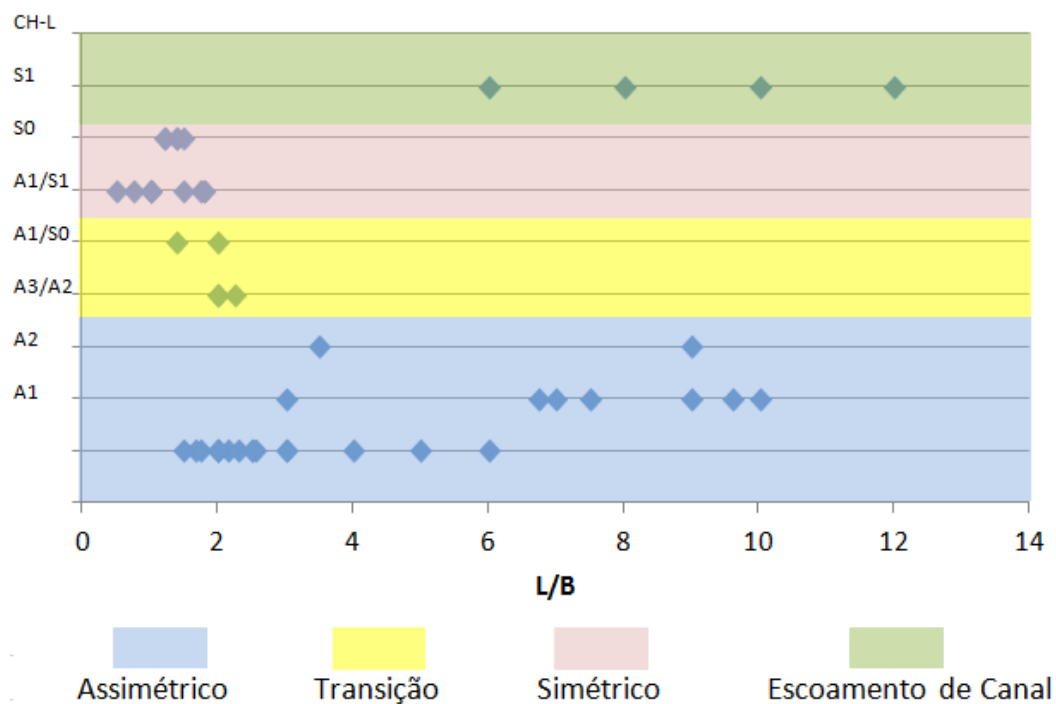


FIGURA 3.12. – Relação entre *taxa de aspecto* (L/B) e o tipo de escoamento
 Fonte: adaptado de CAMNASIO *et al.* (2011)

Por fim, uma comparação entre a *taxa de expansão* B/b e o tipo de escoamento não revela nenhuma limitação na transição dos mesmos, como mostrado na FIGURA 3.13. Em outras palavras: para a maioria dos valores de B/b existem simulações simétricas (CH-L, S1 e S0) e assimétricas (A1, A2, A3/A2)

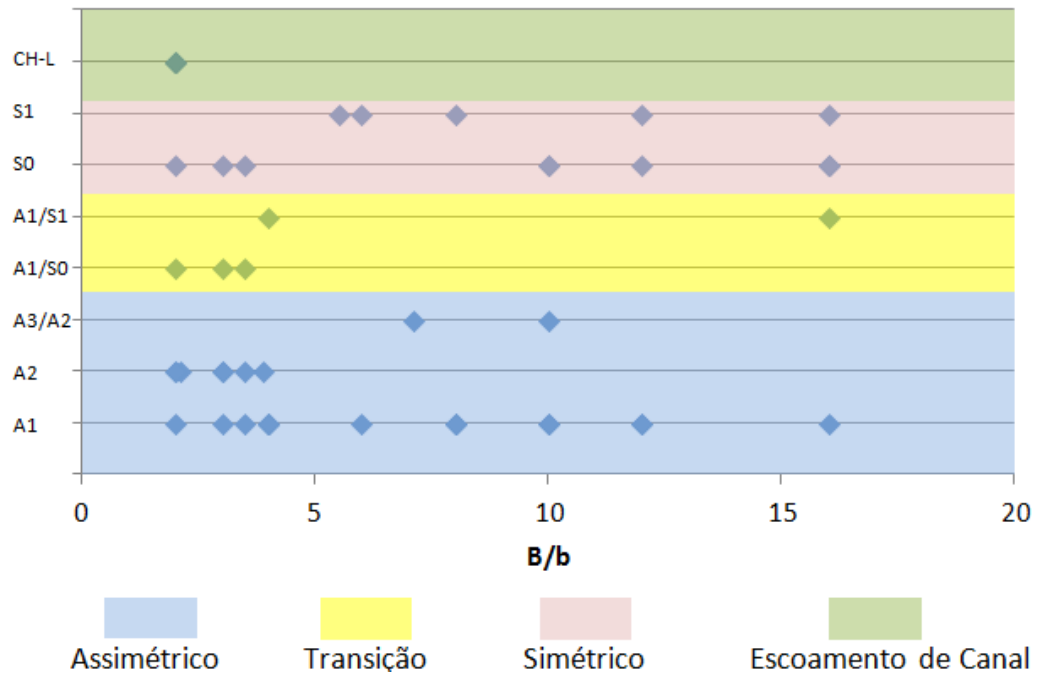


FIGURA 3.13. – Relação entre *taxa de expansão* B/b e o tipo de escoamento
 Fonte: adaptado de CAMNASIO *et al.* (2011)

3.4.1 Equivalência entre *parâmetro de forma* e L/B e B/b

De modo a determinar o *parâmetro de forma* em função da *taxa de aspecto* (L/B) e da *taxa de expansão* (B/b) pode-se fazer as seguintes transformações:

$$\frac{L}{B} = x \rightarrow B = \frac{L}{x}$$

$$\frac{B}{b} = y \rightarrow b = \frac{B}{y} = \frac{L}{x \times y}$$

$$\Delta B = \frac{B - b}{2} = \frac{\frac{L}{x} - \frac{L}{x \times y}}{2}$$

$$\text{Parâmetro de Forma} = \frac{L}{\Delta B^{0,60} b^{0,40}} = \frac{L}{\left(\frac{\frac{L}{x} - \frac{L}{x \times y}}{2}\right)^{0,60} \frac{L}{x \times y}^{0,40}}$$

$$\text{Parâmetro de Forma} = \frac{L}{L \times \left(\frac{\frac{1}{x} - \frac{1}{x \times y}}{2}\right)^{0,60} \left(\frac{1}{x \times y}\right)^{0,40}} = \frac{1}{\left(\frac{\frac{1}{x} - \frac{1}{x \times y}}{2}\right)^{0,60} \left(\frac{1}{x \times y}\right)^{0,40}}$$

$$\text{Parâmetro de Forma} = \frac{2^{0,60}}{\left(\frac{1}{x} - \frac{1}{x \times y}\right)^{0,60} \frac{1}{x \times y}^{0,40}} \quad (3.9)$$

Verifica-se portanto que a grandeza “L” não interfere no valor do *parâmetro de forma* para os mesmos valores de *taxa de expansão* e de *taxa de aspecto*.

Na FIGURA 3.14 são mostradas as relações entre o *parâmetro de forma*, a *taxa de aspecto* e a *taxa de expansão*. Dentro das malhas se encontram os valores aproximados do *parâmetro de forma*. Externamente, nos eixos das abscissas e ordenadas, se encontram os valores da *taxa de aspecto* e *taxa de expansão* a partir dos quais foram gerados os valores de *parâmetro de forma*.

Utilizando-se da FIGURA 3.14 pode-se perceber que valores de *parâmetro de forma* entre 6 e 7 apenas são gerados para *taxas de aspecto* próximas a 2 e *taxas de expansão* abaixo de 8. Este fato concilia as abordagens propostas por Dufresne *et al.* (2011) e Camnasio *et al.* 2012.

20	5	10	16	21	26	31	36	41	47	52	57	62	67	73	78	83	88	93	98	104
19	5	10	15	20	25	31	36	41	46	51	56	61	66	71	76	81	86	92	97	102
18	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
17	5	10	15	20	24	29	34	39	44	49	54	59	63	68	73	78	83	88	93	98
16	5	10	14	19	24	29	33	38	43	48	53	57	62	67	72	76	81	86	91	96
15	5	9	14	19	23	28	33	37	42	47	51	56	61	65	70	75	79	84	89	93
14	5	9	14	18	23	27	32	36	41	46	50	55	59	64	68	73	77	82	87	91
13	4	9	13	18	22	27	31	35	40	44	49	53	58	62	67	71	75	80	84	89
12	4	9	13	17	22	26	30	35	39	43	47	52	56	60	65	69	73	78	82	86
11	4	8	13	17	21	25	29	34	38	42	46	50	54	59	63	67	71	75	80	84
10	4	8	12	16	20	24	28	32	37	41	45	49	53	57	61	65	69	73	77	81
9	4	8	12	16	20	24	27	31	35	39	43	47	51	55	59	63	67	71	74	78
8	4	8	11	15	19	23	26	30	34	38	41	45	49	53	57	60	64	68	72	75
7	4	7	11	14	18	22	25	29	33	36	40	43	47	51	54	58	62	65	69	72
6	3	7	10	14	17	21	24	28	31	35	38	42	45	48	52	55	59	62	66	69
5	3	7	10	13	16	20	23	26	30	33	36	40	43	46	49	53	56	59	63	66
4	3	6	9	13	16	19	22	25	28	31	34	38	41	44	47	50	53	56	60	63
3	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30	33	36	39	42	45	48	51	54	57	60
2	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30	33	36	39	42	45	49	52	55	58	61
1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20

FIGURA 3.14. – Valores de *parâmetros de forma* para B/b e L/B

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Simulação numérica de bacias rasas

Para analisar o comportamento hidráulico do escoamento são realizadas simulações numéricas em diversas configurações de comprimento e largura de bacias de pequena profundidade. O comportamento hidráulico será analisado principalmente quanto ao comportamento das linhas de fluxo na bacia.

Para simular as condições de escoamento em bacias rasas é utilizado o programa computacional Basement, desenvolvido pela ETHZ, em sua versão 2.5.3. Para a interpretação dos resultados e geração das geometrias são utilizados os programas QGIS e Excel, sendo o Basement e o QGIS gratuitos. Além disso, o QGIS apresenta código aberto, o que pode representar uma vantagem, caso seja necessário fazer adaptações no programa à realidade encontrada.

O programa utiliza as premissas de escoamento bidimensional para calcular as variáveis hidráulicas do escoamento. A construção do modelo hidráulico segue as etapas descritas nos item a seguir.

4.1.1 Geração de nuvem de pontos

Uma planilha foi criada no *software* Excel para gerar uma sequência de pontos referentes ao fundo da bacia com coordenadas nos eixos x , y , z . Uma macro foi criada para auxiliar no processo. Seu código se encontra no Apêndice I.

A partir de valores de comprimento da bacia (L), largura da bacia (B), largura do canal de entrada e de saída (b), comprimento dos canais de entrada e saída, o deslocamento em relação ao centro dos canais de entrada e saída, incremento dos pontos na direção x e y e valor de altura da base e da parede desta, é gerada a nuvem de pontos que representa a base da bacia rasa desejada. Estes pontos são registrados nas três primeiras colunas das planilhas e devem ser copiados e colados em um arquivo de texto simples. A planilha em questão é mostrada na FIGURA 4.1.

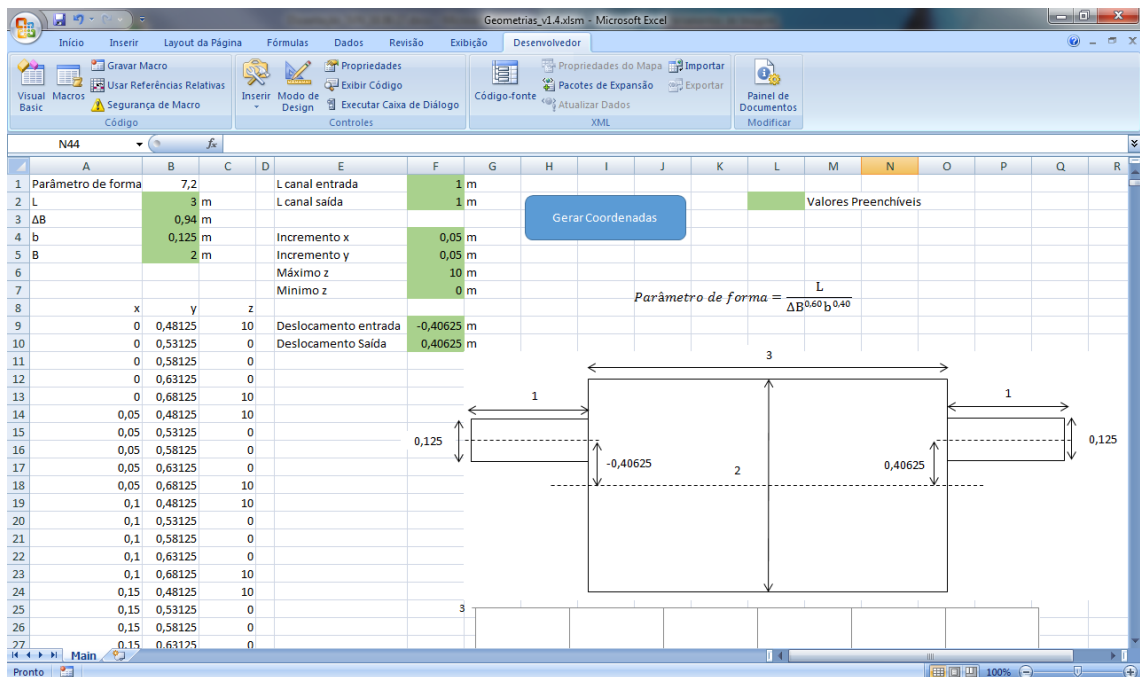


FIGURA 4.1. – Planilha usada para a geração das coordenadas xyz

4.1.2 Geração do arquivo de geometria a partir da nuvem de pontos

A geração do arquivo de geometria é feita utilizando-se o *plugin* Basemesh (criado pelos mesmos desenvolvedores do programa Basement) no programa QGIS, em sua versão 2.6.1 (Brighton). A partir do arquivo de texto gerado na planilha descrita no item 4.1.1 tem-se como resultado o arquivo de geometria bidimensional (extensão .2dm) para ser utilizado no programa Basement. Um exemplo de utilização deste procedimento é mostrado na FIGURA 4.2.

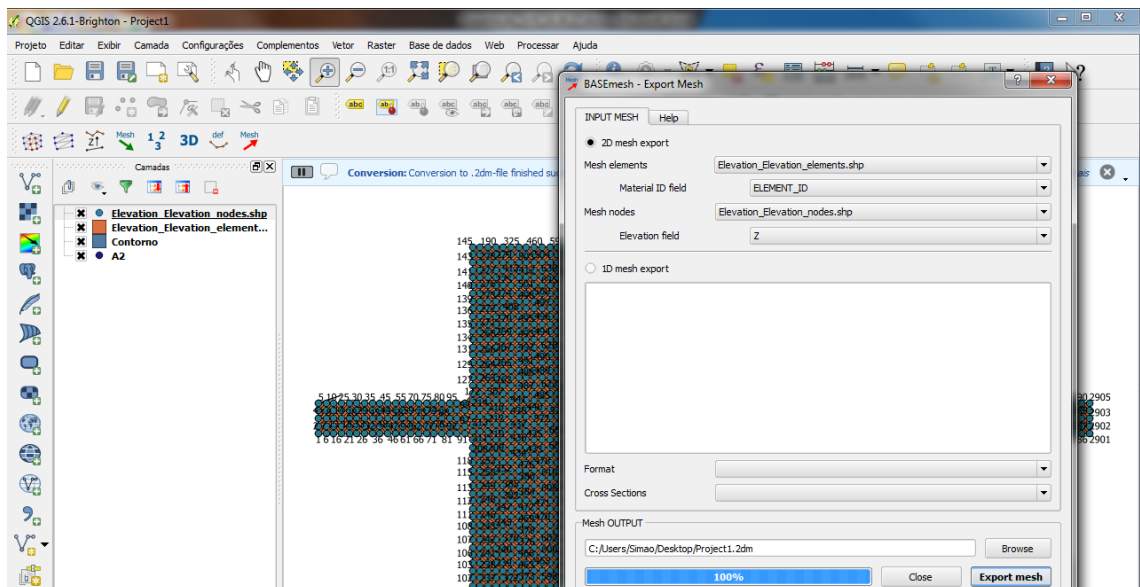


FIGURA 4.2. – Exemplo de utilização do *plugin* Basemesh para gerar o arquivo de geometria

4.1.3 Configuração do modelo hidráulico e simulação a partir do arquivo de geometria gerado

Uma vez definida a geometria e gerado o arquivo contendo a mesma, passa-se a configurar o modelo hidráulico Basement para as características específicas da geometria - quais nós correspondem a entrada de água e quais correspondem a saída. Também são definidos parâmetros hidráulicos, apresentados a seguir:

- Rugosidade de fundo ($n=0,025$ ou $n=0,070$);
- Duração de simulação: 5min ou 10min;
- Vazão de entrada 0,8 L/s, 1,25 L/s ou 3,5 L/s;
- Aceleração da gravidade: $9,81 \text{ m/s}^2$;
- Viscosidade cinemática: $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$;
- Massa específica: 1000 kg/m^3 .

Um exemplo de utilização do programa Basement é mostrado na FIGURA 4.3.

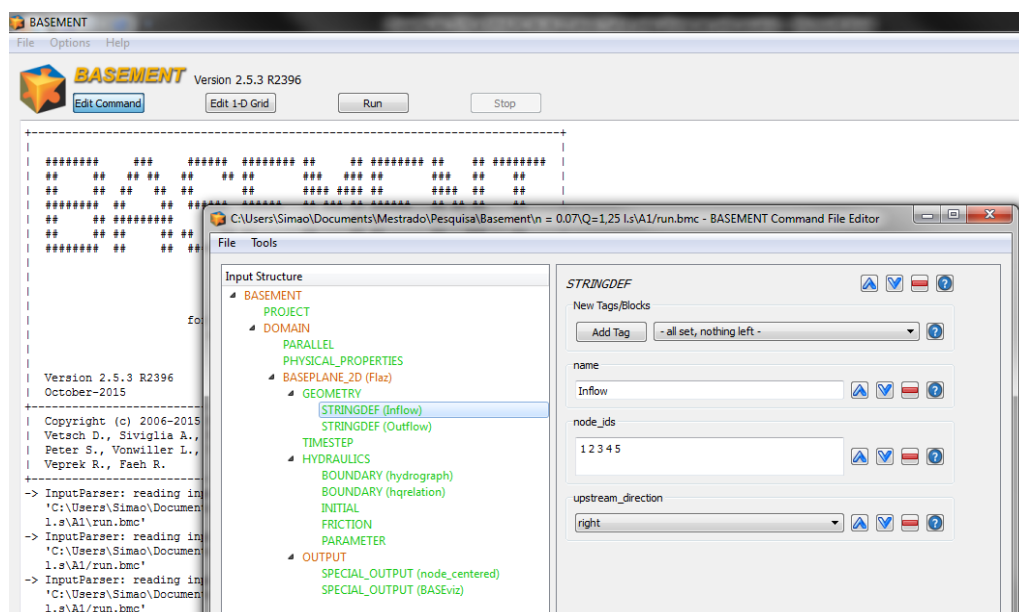


FIGURA 4.3. – Exemplo de utilização do *software* Basement

4.1.4 Interpretação e leitura de resultados do programa Basement

Para se interpretar de maneira gráfica os resultados do Basement, faz-se uso novamente do programa QGIS e se utiliza o *plugin* Crayfish - que permite abrir o arquivo de resultados gerado pelo *software* Basement e interpretá-lo, como mostrado na FIGURA 4.4.

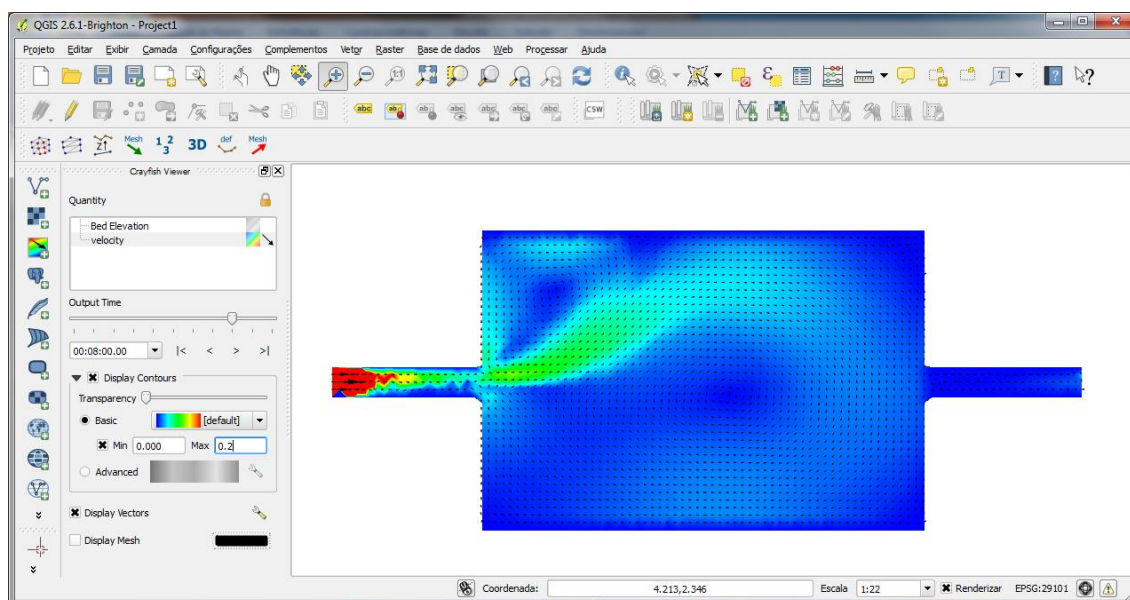


FIGURA 4.4. – Exemplo de utilização do *plugin* Crayfish

Na FIGURA 4.5 são mostradas as etapas de geração do modelo.

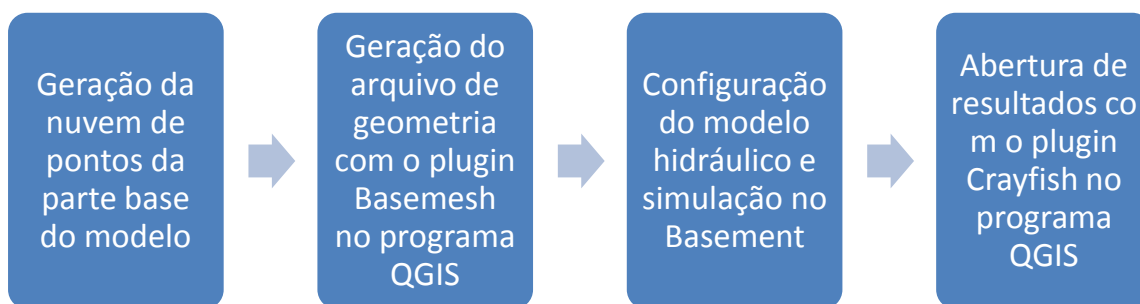


FIGURA 4.5. – Fluxograma da geração do modelo hidráulico

4.1.5 Verificação da influência do *parâmetro de forma* no campo de velocidades de bacias rasas

Duas etapas pontuam a verificação da influência do *parâmetro de forma* na formação do campo de velocidades, explicitadas nos itens 4.1.1.1 e 4.1.1.2.

4.1.5.1 Validação do modelo com dois cenários presentes na bibliografia

De modo a verificar a representatividade do modelo numérico são comparados os resultados experimentais de Kantoush *et al.* (2007) e Dewals *et al.* (2008) aos gerados com o modelo numérico para as condições geométricas utilizadas por esses pesquisadores.

4.1.5.2 Simulação de cenários com diferentes larguras de canais de entrada e saída

Após a validação do uso do modelo numérico (item 4.1.5.1), passa-se a simulação das características geométricas indicadas por Dufresne *et al.* (2010) em suas pesquisas experimentais, usando-se o mesmo *software* do item 4.1, Para verificar a influência do *parâmetro de forma* apresentado por Dufresne *et al.* (2011), são gerados modelos numéricos para constatar o tipo de escoamento formado (simétrico ou assimétrico).

Desta forma são simuladas, para diferentes valores de largura de canal de entrada e saída (com *parâmetro de forma* entre 6,2 e 6,8 – mesmo intervalo considerado como de interesse por Dufresne *et al.* (2010)) as condições de escoamento hidráulico e a formação de escoamentos assimétricos não periódicos. Com uma vazão de 0,5 m³/s, as seguintes configurações geométricas serão testadas:

Tabela 4.1. – Geometrias a serem experimentadas

<i>Parâmetro de forma</i>	6,2	6,3	6,4	6,5	6,7	6,8
L (m)	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
ΔB (m)	1,83	1,88	1,93	1,98	2,03	2,05
b (m)	1,35	1,25	1,15	1,05	0,95	0,90
B (m)	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00

Observa-se que todas as geometrias testadas nesta etapa possuem a mesma *taxa de aspecto* (L/B).

4.1.6 Verificação da influência de diferentes geometrias próximas às zonas de instabilidade mostradas na literatura na formação do escoamento

Quinze modelos são criados para simular condições de transição próximas às mostradas na literatura, estes são mostrados na Tabela 4.2, Tabela 4.3 e Tabela 4.4. Eles foram escolhidos

de modo a cobrir a faixa de transição entre escoamento simétrico e assimétrico, mostrada na FIGURA 4.6. Também valores de parâmetro de forma próximos a 5 foram incluídos de modo a contemplar os valores que mais se correlacionam com a transição de escoamentos como mostrado na FIGURA 3.11.

A geometria com *parâmetro de forma* igual a 7,2 corresponde às dimensões do modelo em laboratório a ser testado no Centro de Pesquisas Hidráulicas da UFMG. Da mesma forma, todas as geometrias testadas possuem o mesmo comprimento, de 3 metros, como o modelo de laboratório.

Tabela 4.2. – Geometrias para $b = 0,125\text{m}$

<i>Parâmetro de forma</i>	6,6	6,7	7,2	8,0	8,6
ΔB (m)	1,09	1,04	0,94	0,79	0,69
B (m)	2,3	2,2	2	1,7	1,5
L/B	1,3	1,4	1,5	1,8	2,0
B/b	18	18	16	14	12

Tabela 4.3. – Geometrias para $b = 0,2\text{m}$

<i>Parâmetro de forma</i>	5,5	5,7	6,1	6,8	7,4
ΔB (m)	1,05	1,00	0,90	0,75	0,65
B (m)	2,3	2,2	2	1,7	1,5
L/B	1,3	1,4	1,5	1,8	2,0
B/b	12	11	10	9	8

Tabela 4.4. – Geometrias para $b = 0,4\text{m}$

<i>Parâmetro de forma</i>	4,5	4,6	4,9	5,6	6,2
ΔB (m)	0,95	0,90	0,80	0,65	0,55
B (m)	2,3	2,2	2	1,7	1,5

<i>Parâmetro de forma</i>	4,5	4,6	4,9	5,6	6,2
L/B	1,3	1,4	1,5	1,8	2,0
B/b	6	6	5	4	4

As geometrias propostas compreendem o intervalo entre escoamentos simétricos e assimétricos da bibliografia, como mostrado na FIGURA 4.6.

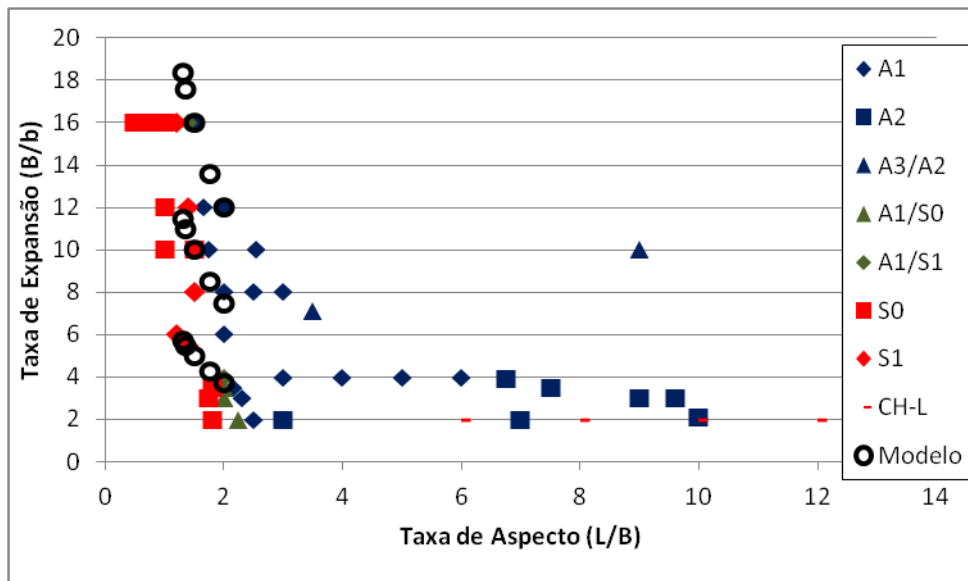


FIGURA 4.6. – *Taxas de aspecto e expansão das geometrias da bibliografia e simuladas*

Fonte: adaptado de CAMNASIO *et al.* (2011)

Parte das geometrias estudadas se encontram com relações de *parâmetro de forma* versus *taxa de aspecto* não presentes na bibliografia, como mostrado na FIGURA 4.7. Tal fato permite acrescentar ao estado do conhecimento atual esta gama de configurações geométricas exploradas.

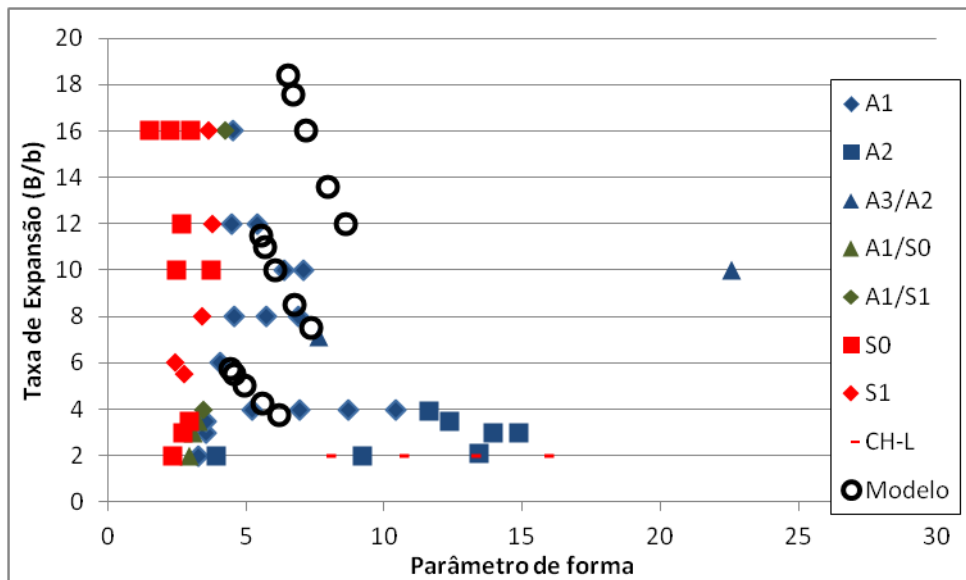


FIGURA 4.7. – Taxa de Expansão e parâmetro de forma das geometrias da bibliografia e simuladas

Fonte: adaptado de CAMNASIO *et al.* (2011)

4.1.7 Índice de velocidade do vórtice

De modo a se verificar quantitativamente a relevância do vórtice formado em relação à velocidade média da bacia propõe-se o índice de velocidade do vórtice (IVV), calculado pela seguinte expressão:

$$IVV = \frac{\text{Velocidade do Vórtice ao Longo da bacia}}{\text{Velocidade Média Longitudinal na Bacia}} \quad (4.1)$$

Na FIGURA 4.8 indica-se o vetor de velocidade do vórtice considerado para o cálculo da velocidade do vórtice ao longo da bacia:

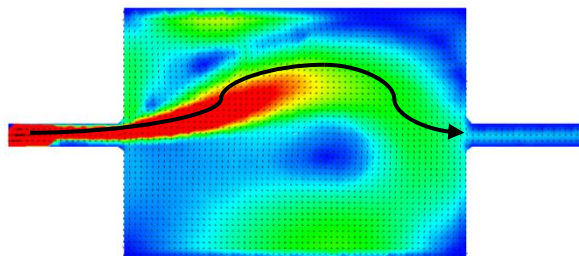


FIGURA 4.8. – Indicação do vetor de velocidades considerado para o vórtice

A velocidade média longitudinal da bacia é calculada pela seguinte expressão:

$$VMLB = \frac{Q}{h \times B} \quad (4.2),$$

Em que:

VMLB é a velocidade média longitudinal do escoamento na bacia em m/s;

Q é a vazão de entrada em m³/s;

h é a profundidade em m;

B é a largura da bacia em m.

4.1.8 Verificação da influência de parâmetros hidráulicos não considerados na literatura

As geometrias listadas no item 4.1.6 são testadas para as vazões de 0,8 L/s, 1,25 L/s, 3,5 L/s, de maneira similar às vazões testadas por Kantoush (2008). Concorrentemente, as quinze configurações geométricas são testadas para valores de coeficiente de rugosidade de Manning (n) de 0,025 e 0,070. Estes valores correspondem à faixa de n normalmente encontradas em um canal com espécies vegetais, segundo Baptista e Coelho (2003). O modelo existente em laboratório tem rugosidade estimada de 0,012.

A partir da comparação entre as configurações de velocidades para vazões e rugosidades distintas, a influência destes fatores é levantada.

4.2 Validação experimental de cenários de interesse

Os cenários correspondentes ao *parâmetro de forma* 7,2, simulados computacionalmente deverão ser validados em aparato experimental montado no Centro de Pesquisas Hidráulicas da UFMG.

O aparato existente, mostrado na FIGURA 4.9 tem a seguinte geometria: 3,0m de comprimento, 2,0m de largura, largura do canal de entrada de 0,125m e comprimento do canal de entrada de 1,0m. Estas dimensões são mostradas na FIGURA 4.10. Ele é feito de chapa metálica revestida com pintura epóxi, e tem a posição dos canais de entrada e saída passível de ser alterada.

Para a recirculação de água, um conjunto moto-bomba recalca a água de um reservatório para o canal de entrada da bacia. O canal de saída verte num segundo reservatório, de onde um segundo conjunto moto-bomba recalca a água novamente para o primeiro reservatório. Este funcionamento é representado na FIGURA 4.11.



FIGURA 4.9.– Aparato experimental utilizado

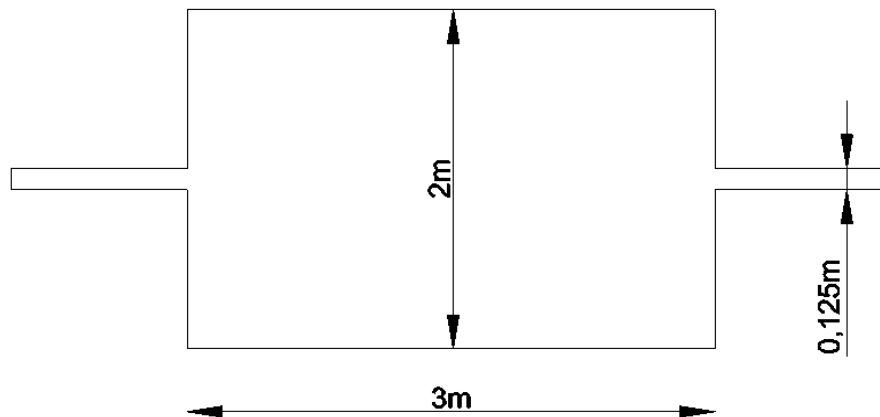


FIGURA 4.10.– Dimensões da bacia rasa retangular existente

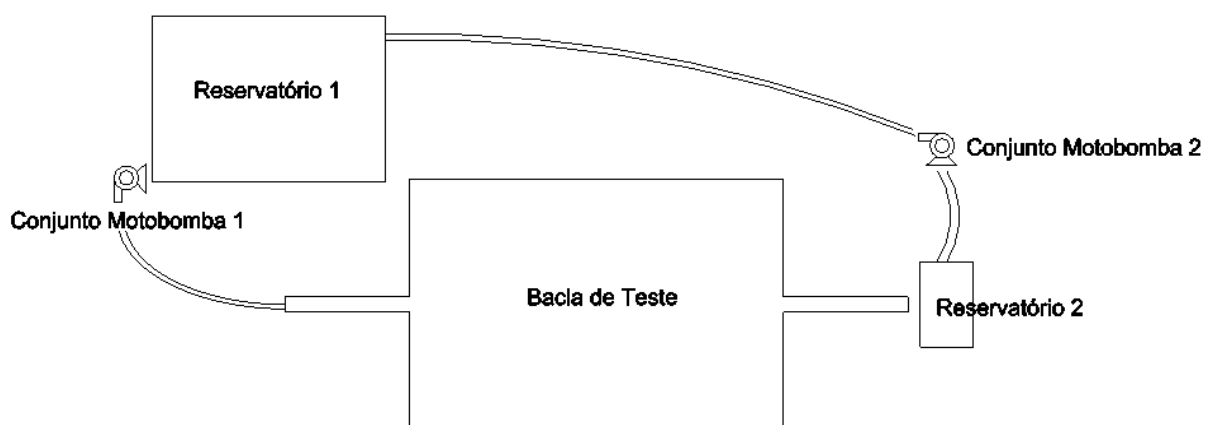


FIGURA 4.11.– Esquema do sistema hidráulico do aparato experimental

Para modular a vazão de entrada, utiliza-se um inversor de frequência no conjunto motobomba 1 de marca WEG modelo CFW09, para adequar a vazão de saída, utiliza-se um

registro gaveta no recalque do segundo conjunto moto-bomba. A vazão de entrada foi medida pelo método volumétrico e correlacionada com a rotação do conjunto moto-bomba 1, como mostrado na Tabela 4.5.

Tabela 4.5. – Correlação entre vazão e rotação do conjunto motobomba1

<i>Rotação (rpm)</i>	<i>Vazão (L/s)</i>
695	0,50
1430	1,25
3445	3,40

4.2.1 Aparato experimental de medição da velocidade superficial de bacias rasas

O método utilizado para a medição da velocidade superficial, suposta como bidimensional é chamado de LSPIV – *Large Scale Particle Image Velocimetry* – Medição de velocidade de partículas em larga escala. Nele, uma câmera de alta resolução registra a posição de flutuadores (tampas plásticas de garrafas) na superfície da água e calcula o sentido e a velocidade do escoamento de acordo com a movimentação dos mesmos.

No aparato existente, coloca-se uma câmera, com resolução de 15 megapixels da marca Logitech modelo C920, fixada num pórtico 4,0m acima da bacia rasa. Esta configuração, mostrada na FIGURA 4.12, permite o registro da totalidade da bacia.

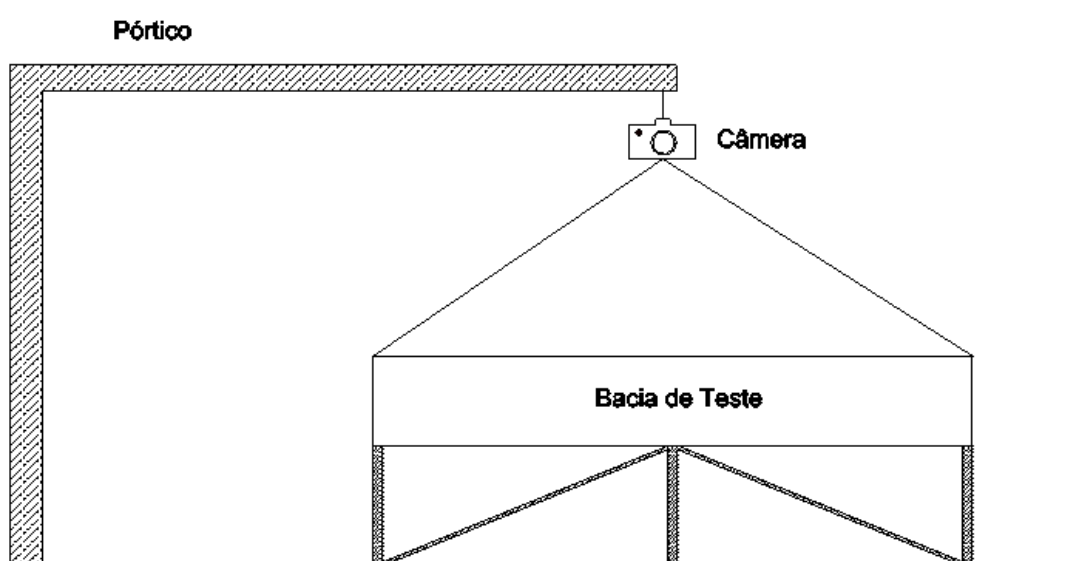


FIGURA 4.12.– Esquema do aparato de registro de imagens – LSPIV

4.2.2 Processamento das imagens obtidas no aparato experimental

Para o processamento das imagens obtidas com a câmera e o aparato experimental é utilizado o programa Fudaa LSPIV, em sua versão 1.5.1. Este programa foi desenvolvido pelo CEREMA - centro de estudos e de expertise sobre riscos, meio ambiente, mobilidade e planejamento territorial francês. Os passos para a utilização do programa são:

1. Importa-se o vídeo gravado para o programa e seleciona-se os períodos de tempo em que o posicionamento dos flutuadores melhor representa as linhas de escoamento da bacia;
2. Definem-se ao menos cinco pontos de referência na imagem e associam-se as coordenadas do mesmo para ortorretificação;
3. Estabelecem-se os “parâmetros de busca“, o local em que se iniciará a busca dos flutuadores e seu alcance, baseado na velocidade suposta dos mesmos nas direções x e y;
4. Configuram-se os pontos de rede, pontos em que serão calculados os resultados vetoriais;
5. Calcula-se os vetores de velocidades para os pontos de rede definidos.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Influência do parâmetro de forma na conformação do campo de velocidades

5.1.1 Validação do modelo com dois cenários presentes na bibliografia

Nos componentes (b) e (d) da FIGURA 5.1 são expostos os resultados obtidos no modelo numérico. Estes resultados se referem à condição estável do escoamento. Observa-se que para o valor de *parâmetro de forma* de 7,2, há a formação de um desvio do fluxo principal para o norte e a formação de um vórtice na região sul. Para o *parâmetro de forma* de forma de 6,0 há a formação de dois vórtices simétricos nas posições norte e sul.

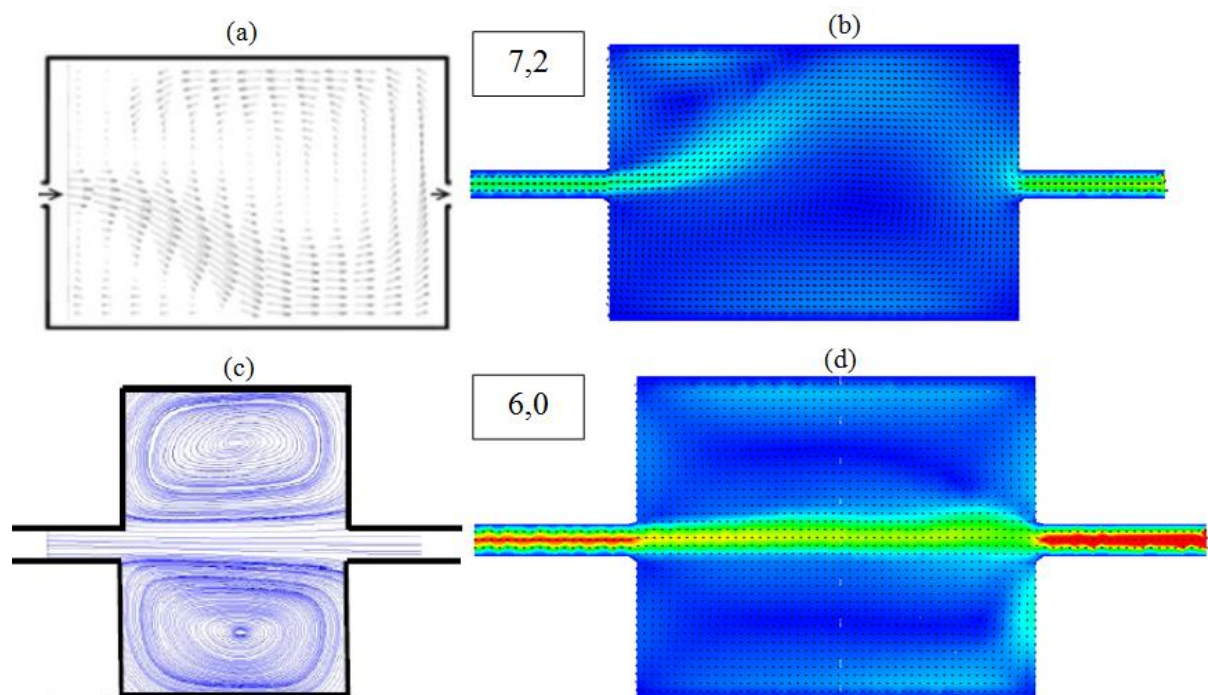


FIGURA 5.1. - Comparação entre os resultados de laboratório (a, c) e do modelo computacional (b, d)

Fonte: (a) KANTOUSH *et al.* (2007), (c) DEWALS *et al.* (2008)

Verifica-se que o modelo numérico emulou o comportamento do escoamento observado em laboratório para o valor de *parâmetro de forma* de 7,2 de maneira verticalmente inversa: em laboratório o fluxo principal se desvia para o sul e na simulação para o norte; de maneira similar há a formação de um vórtice ao norte nos ensaios de laboratório. Para o *parâmetro de forma* de 6,0 há a formação de dois vórtices longitudinalmente simétricos em relação ao sentido principal do escoamento.

5.1.2 Simulação de cenários com diferentes larguras de canais de entrada e saída

Com o intuito de melhor conhecer a transição entre escoamento simétrico e assimétrico, foram elaboradas simulações com as características geométricas citadas na Tabela 4.1. O método utilizado para estas simulações foi o mesmo utilizado nas simulações do item 5.1.1.

Na FIGURA 5.2 a seguir são mostrados os campos de velocidades obtidos para estes valores de *parâmetro de forma* após 1 minuto de simulação e 3 minutos.

Pode-se observar que o *parâmetro de forma* influencia a formação do escoamento. De fato, em relação aos valores simulados para os *parâmetros de forma* entre 6,2 a 6,8, observa-se uma tendência da redução da intensidade dos vórtices formados ao se comparar os resultados das simulações entre 1 e 3 minutos. Tal redução se apresenta pela diminuição da velocidade do vórtice, como mostrado na FIGURA 5.2.

Os resultados obtidos concordam com as observações de Kantoush e Schleiss (2014), contudo, divergem do relatado por Peltier *et al.* (2014b) sobre a ocorrência de escoamentos do tipo assimétricos para *parâmetros de forma* acima de 6,2. Cabe ressaltar que o aparato experimental utilizado por aquele autor possui uma *taxa de aspecto* menor que 1, muito inferior a outros estudos e portanto, mais sujeito a erro de escala.

5.1.3 Verificação da influência de diferentes geometrias próximas às zonas de instabilidade na formação do escoamento

Os modelos numéricos foram gerados para cada uma das quinze geometrias presentes na Tabela 4.2, Tabela 4.3 e Tabela 4.4. As geometrias definidas no item 4.1.6 foram simuladas por 10 minutos para as vazões de 0,8 L/s, 1,25 L/s, 3,5 L/s, com uma rugosidade equivalente ao coeficiente de Manning de 0,025 e 0,070.

Os resultados das simulações são apresentados nas FIGURA 5.3 a FIGURA 5.20. Em cada figura consta, além da imagem do campo de velocidades gerado, os valores referentes ao *parâmetro de forma* (P.F.), *taxa de aspecto* (T.A.), *taxa de expansão* (T.E.), ou índice de velocidade do vórtice (I.V.V.) e a classificação do escoamento em Simétrico (S0 e S1), assimétrico (A1 e A2), de canal (CH-L) e de transição, conforme a FIGURA 3.6. Estes resultados se encontram em forma de tabela no Apêndice II.

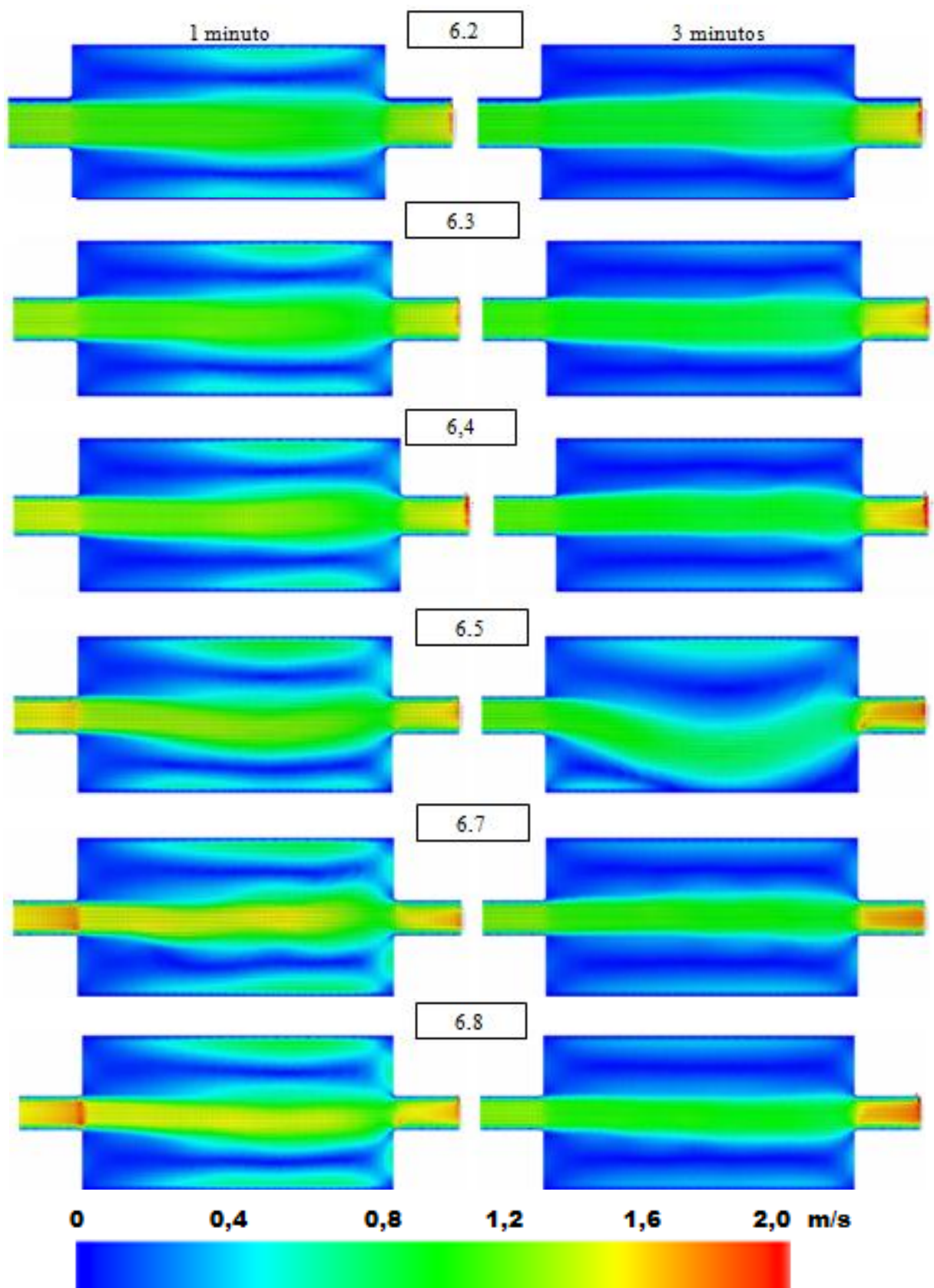


FIGURA 5.2. - Campos de velocidade em função do *parâmetro de forma*

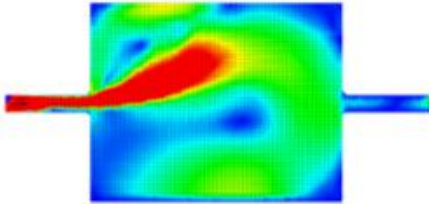
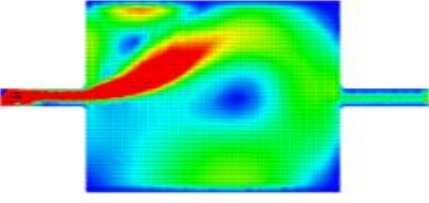
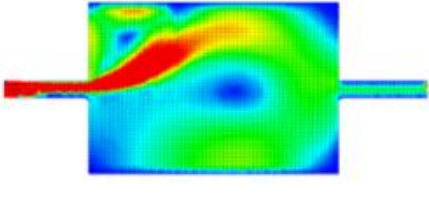
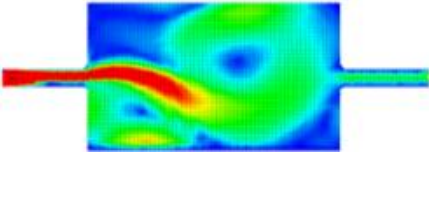
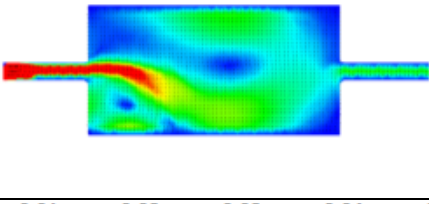
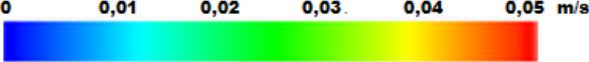
Campo de velocidades	Características de forma
	<p>B = 2,3 m Parâmetro de Forma= 6,6 L/B = 1,3 B/b = 18 I.V.V. = 7,12 Tipo de Escoamento: A1</p>
	<p>B = 2,2 m Parâmetro de Forma = 6,7 L/B= 1,4 B/B= 18 I.V.V. = 5,29 Tipo de Escoamento: A1</p>
	<p>B = 2,0 m Parâmetro de Forma = 7,2 L/B= 1,5 B/B= 16 I.V.V. = 5,23 Tipo de Escoamento: A1</p>
	<p>B = 1,7 m Parâmetro de Forma = 8,0 L/B= 1,8 B/B= 14 I.V.V. = 4,97 Tipo de Escoamento: A1</p>
	<p>B = 1,5 m Parâmetro de Forma = 8,6 L/B= 2,0 B/B= 12 I.V.V. = 4,00 Tipo de Escoamento: A1</p>
	<p>Velocidades (m/s)</p>

FIGURA 5.3. - Campos de velocidade para $n=0,025$, $Q = 0,80$ L/s e $b=0,125$ m

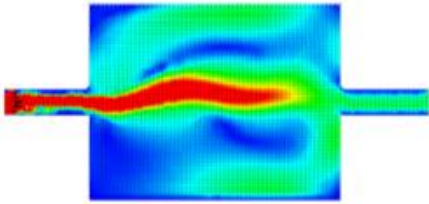
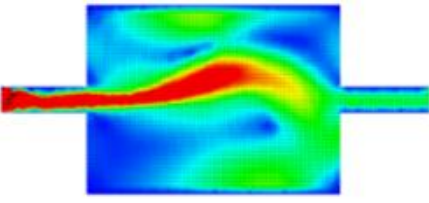
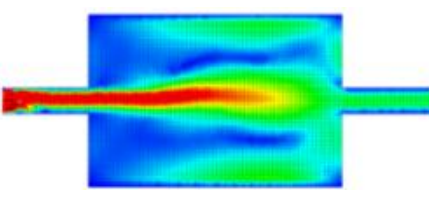
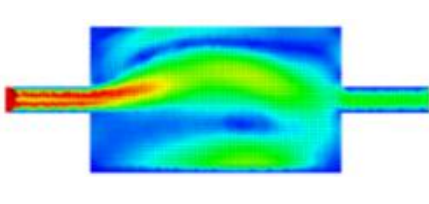
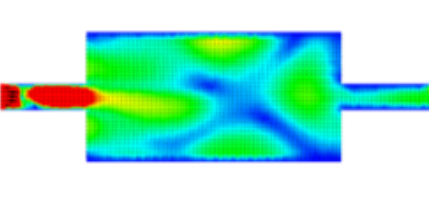
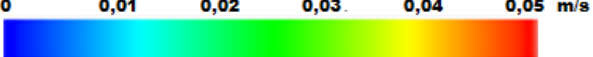
Campo de velocidades	Características de forma
	<p>B = 2,3 m Parâmetro de Forma = 5,5 L/B= 1,3 B/B= 12 I.V.V. = 6,90 Tipo de Escoamento: Transição S0/A1</p>
	<p>B = 2,2 m Parâmetro de Forma = 5,7 L/B= 1,4 B/B= 11 I.V.V. = 7,48 Tipo de Escoamento: A1</p>
	<p>B = 2,0 m Parâmetro de Forma = 6,1 L/B= 1,5 B/B= 10 I.V.V. = 7,65 Tipo de Escoamento: S0</p>
	<p>B = 1,7 m Parâmetro de Forma = 6,8 L/B= 1,8 B/B= 9 I.V.V. = 4,38 Tipo de Escoamento: transição S0/A1</p>
	<p>B = 1,5 m Parâmetro de Forma = 7,4 L/B= 2,0 B/B= 8 I.V.V. = 2,67 Tipo de Escoamento: indefinido</p>
	<p>Velocidades (m/s)</p>

FIGURA 5.4. - Campos de velocidade para $n=0,025$, $Q =0,80$ L/s e $b=0,20$ m

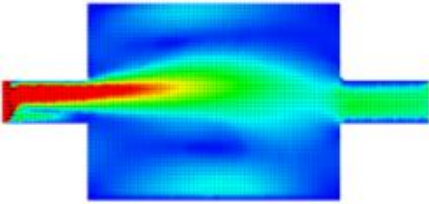
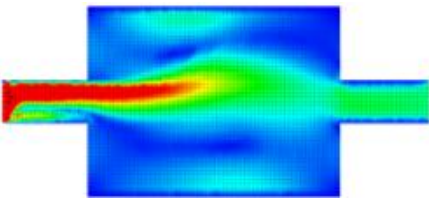
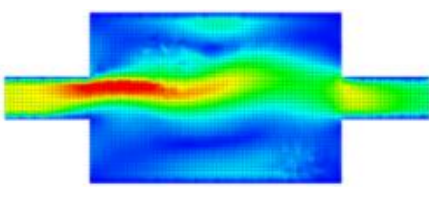
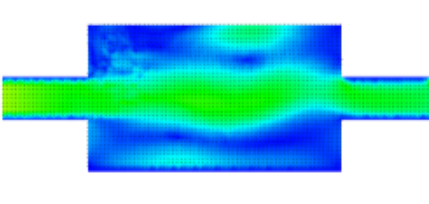
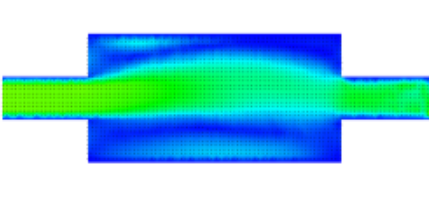
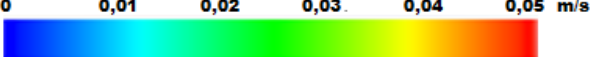
Campo de velocidades	Características de forma
	<p>B = 2,3 m Parâmetro de Forma = 4,5 L/B= 1,3 B/B= 6 I.V.V. = 3,81 Tipo de Escoamento: transição S0/A1</p>
	<p>B = 2,2 m Parâmetro de Forma = 4,6 L/B= 1,4 B/B= 6 I.V.V. = 5,29 Tipo de Escoamento: transição S0/A1</p>
	<p>B = 2,0 m Parâmetro de Forma = 4,9 L/B= 1,5 B/B= 5 I.V.V. = 5,34 Tipo de Escoamento: transição S0/A1</p>
	<p>B = 1,7 m Parâmetro de Forma = 5,6 L/B= 1,8 B/B= 4 I.V.V. = 3,24 Tipo de Escoamento: transição S0/A1</p>
	<p>B = 1,5 m Parâmetro de Forma = 6,2 L/B= 2,0 B/B= 4 I.V.V. = 2,85 Tipo de Escoamento: A1</p>
	<p>Velocidades (m/s)</p>

FIGURA 5.5. - Campos de velocidade para $n=0,025$, $Q =0,80$ L/s e $b=0,40$ m

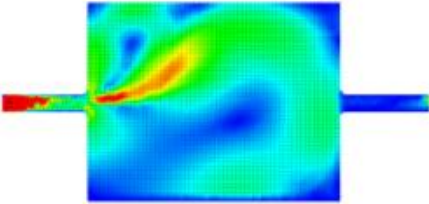
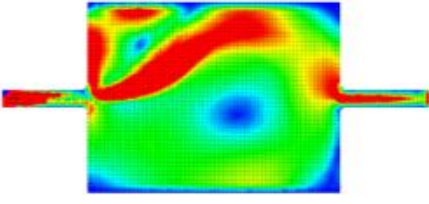
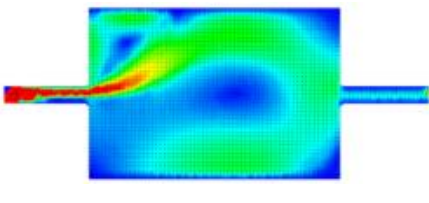
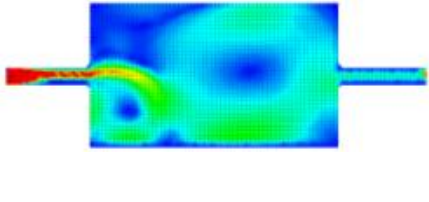
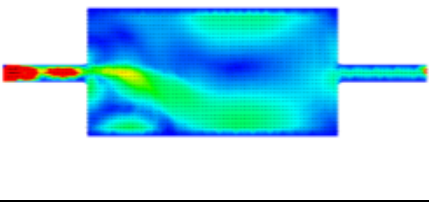
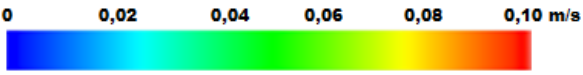
Campo de velocidades	Características de forma
	<p>B = 2,3 m Parâmetro de Forma= 6,6 L/B= 1,3 B/B= 18 I.V.V. = 6,44 Tipo de Escoamento: A1</p>
	<p>B = 2,2 m Parâmetro de Forma = 6,7 L/B= 1,4 B/B= 18 I.V.V. = 12,4 Tipo de Escoamento: A1</p>
	<p>B = 2,0 m Parâmetro de Forma = 7,2 L/B= 1,5 B/B= 16 I.V.V. = 8,46 Tipo de Escoamento: A1</p>
	<p>B = 1,7 m Parâmetro de Forma = 8,0 L/B= 1,8 B/B= 14 I.V.V. = 6,96 Tipo de Escoamento: A1</p>
	<p>B = 1,5 m Parâmetro de Forma = 8,6 L/B= 2,0 B/B= 12 I.V.V. = 5,18 Tipo de Escoamento: A1</p>
	<p>Velocidades (m/s)</p>

FIGURA 5.6. - Campos de velocidade para $n=0,025$, $Q = 1,25$ L/s e $b=0,125$ m

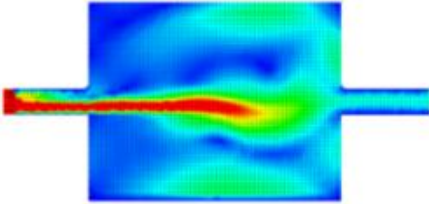
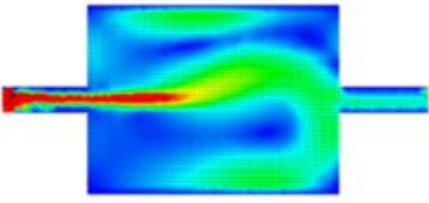
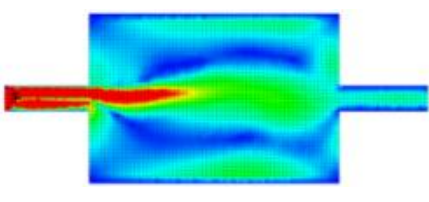
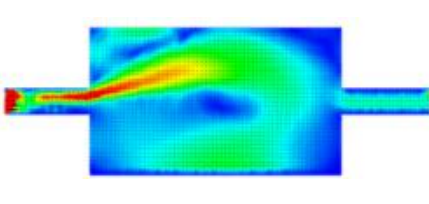
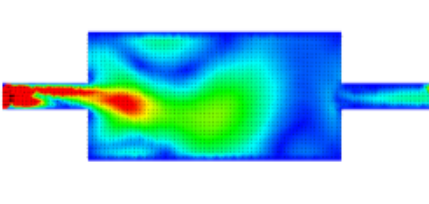
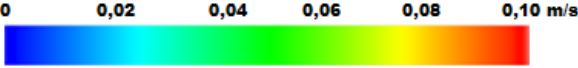
Campo de velocidades	Características de forma
	<p>B = 2,3 m Parâmetro de Forma = 5,5 L/B= 1,3 B/B= 12 I.V.V. = 13,3 Tipo de Escoamento: transição S0/A1</p>
	<p>B = 2,2 m Parâmetro de Forma = 5,7 L/B= 1,4 B/B= 11 I.V.V. = 10,0 Tipo de Escoamento: A1</p>
	<p>B = 2,0 m Parâmetro de Forma = 6,1 L/B= 1,5 B/B= 10 I.V.V. = 11,1 Tipo de Escoamento: transição S0/A1</p>
	<p>B = 1,7 m Parâmetro de Forma = 6,8 L/B= 1,8 B/B= 9 I.V.V. = 7,55 Tipo de Escoamento: A1</p>
	<p>B = 1,5 m Parâmetro de Forma = 7,4 L/B= 2,0 B/B= 8 I.V.V. = 5,42 Tipo de Escoamento: indefinido</p>
	<p>Velocidades (m/s)</p>

FIGURA 5.7. - Campos de velocidade para $n=0,025$, $Q = 1,25$ L/s e $b=0,20$ m

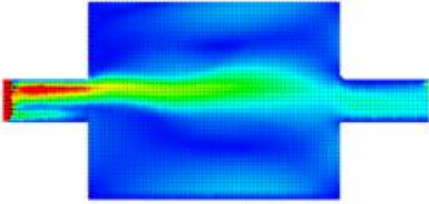
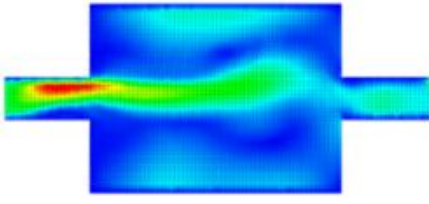
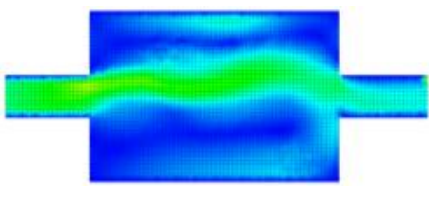
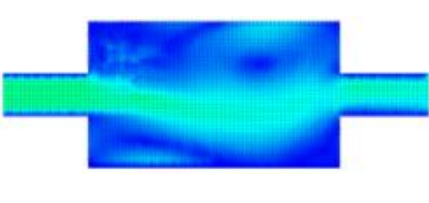
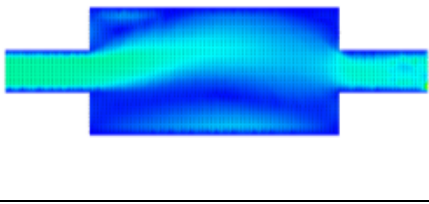
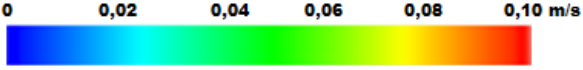
Campo de velocidades	Características de forma
	<p>B = 2,3 m Parâmetro de Forma = 4,5 L/B= 1,3 B/B= 6 I.V.V. = 6,99 Tipo de Escoamento: S0</p>
	<p>B = 2,2 m Parâmetro de Forma = 4,6 L/B= 1,4 B/B= 6 I.V.V. = 6,53 Tipo de Escoamento: transição S0/A1</p>
	<p>B = 2,0 m Parâmetro de Forma = 4,9 L/B= 1,5 B/B= 5 I.V.V. = 6,56 Tipo de Escoamento: transição S0/A1</p>
	<p>B = 1,7 m Parâmetro de Forma = 5,6 L/B= 1,8 B/B= 4 I.V.V. = 3,55 Tipo de Escoamento: A1</p>
	<p>B = 1,5 m Parâmetro de Forma = 6,2 L/B= 2,0 B/B= 4 I.V.V. = 3,35 Tipo de Escoamento: transição S0/A1</p>
	<p>Velocidades (m/s)</p>

FIGURA 5.8. - Campos de velocidade para $n=0,025$, $Q = 1,25$ L/s e $b=0,40$ m

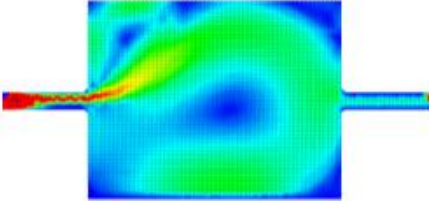
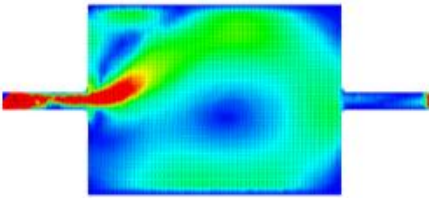
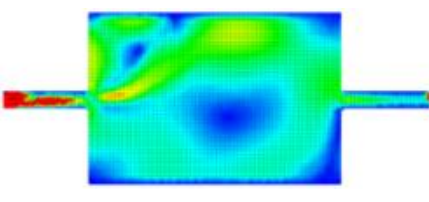
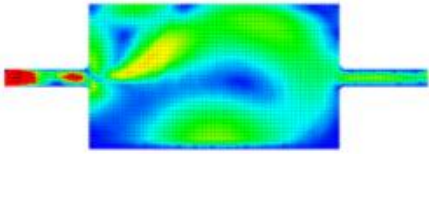
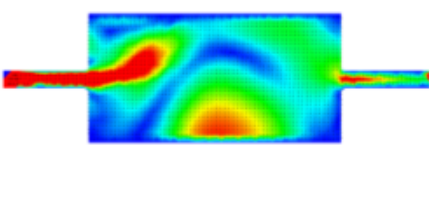
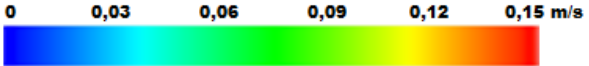
Campo de velocidades	Características de forma
	<p>B = 2,3 m Parâmetro de Forma = 6,6 L/B= 1,3 B/B= 18 I.V.V. = 11,7 Tipo de Escoamento: A1</p>
	<p>B = 2,2 m Parâmetro de Forma = 6,7 L/B= 1,4 B/B= 18 I.V.V. = 9,28 Tipo de Escoamento: A1</p>
	<p>B = 2,0 m Parâmetro de Forma = 7,2 L/B= 1,5 B/B= 16 I.V.V. = 9,13 Tipo de Escoamento: A1</p>
	<p>B = 1,7 m Parâmetro de Forma = 8,0 L/B= 1,8 B/B= 14 I.V.V. = 11,2 Tipo de Escoamento: A1</p>
	<p>B = 1,5 m Parâmetro de Forma = 8,6 L/B= 2,0 B/B= 12 I.V.V. = 11,3 Tipo de Escoamento: A1</p>
	<p>Velocidades (m/s)</p>

FIGURA 5.9. - Campos de velocidade para $n=0,025$, $Q = 3,5$ L/s e $b=0,125$ m

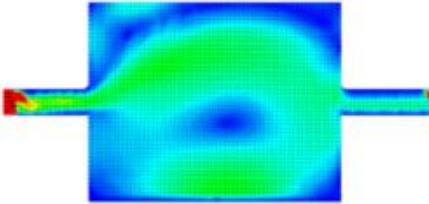
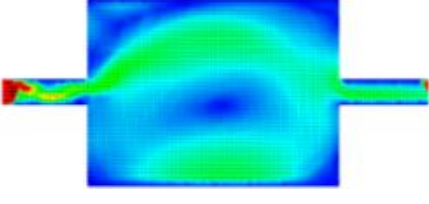
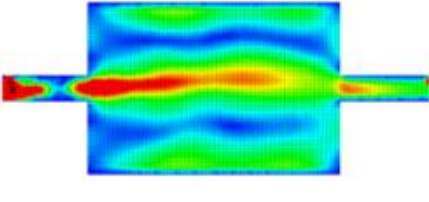
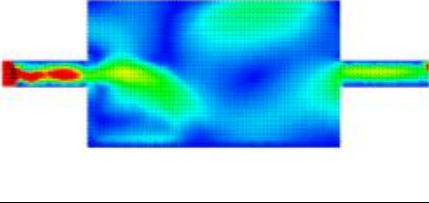
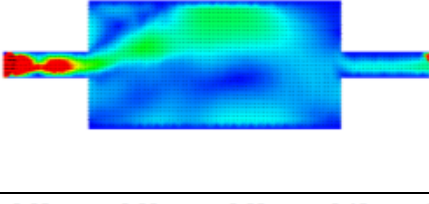
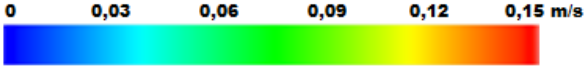
Campo de velocidades	Características de forma
	<p>B = 2,3 m Parâmetro de Forma = 5,5 L/B= 1,3 B/B= 12 I.V.V. = 9,54 Tipo de Escoamento: A1</p>
	<p>B = 2,2 m Parâmetro de Forma = 5,7 L/B= 1,4 B/B= 11 I.V.V. = 9,33 Tipo de Escoamento: A1</p>
	<p>B = 2,0 m Parâmetro de Forma = 6,1 L/B= 1,5 B/B= 10 I.V.V. = 11,9 Tipo de Escoamento: S0</p>
	<p>B = 1,7 m Parâmetro de Forma = 6,8 L/B= 1,8 B/B= 9 I.V.V. = 3,6 Tipo de Escoamento: A1</p>
	<p>B = 1,5 m Parâmetro de Forma = 7,4 L/B= 2,0 B/B= 8 I.V.V. = 6,08 Tipo de Escoamento: A1</p>
	<p>Velocidades (m/s)</p>

FIGURA 5.10. - Campos de velocidade para $n=0,025$, $Q=3,5$ L/s e $b=0,20$ m

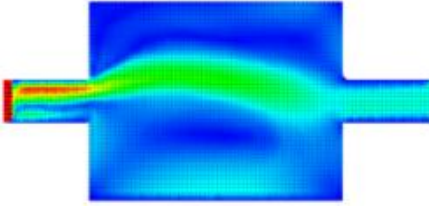
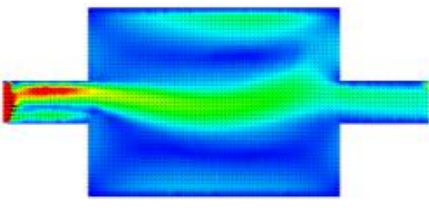
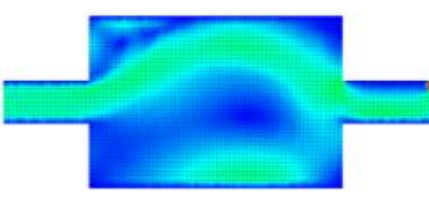
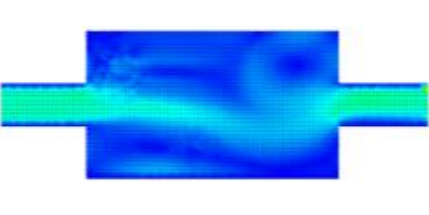
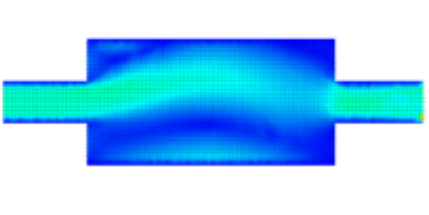
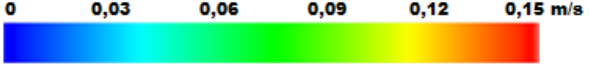
Campo de velocidades	Características de forma
	<p>B = 2,3 m Parâmetro de Forma = 4,5 L/B= 1,3 B/B= 6 I.V.V. = 7,80 Tipo de Escoamento: transição S0/A1</p>
	<p>B = 2,2 m Parâmetro de Forma = 4,6 L/B= 1,4 B/B= 6 I.V.V. = 8,30 Tipo de Escoamento: transição S0/A1</p>
	<p>B = 2,0 m Parâmetro de Forma = 4,9 L/B= 1,5 B/B= 5 I.V.V. = 5,25 Tipo de Escoamento: A1</p>
	<p>B = 1,7 m Parâmetro de Forma = 5,6 L/B= 1,8 B/B= 4 I.V.V. = 4,09 Tipo de Escoamento: A1</p>
	<p>B = 1,5 m Parâmetro de Forma = 6,2 L/B= 2,0 B/B= 4 I.V.V. = 3,70 Tipo de Escoamento: A1</p>
	<p>Velocidades (m/s)</p>

FIGURA 5.11. - Campos de velocidade para $n=0,025$, $Q = 3,5$ L/s e $b=0,40$ m

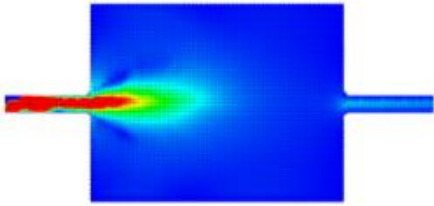
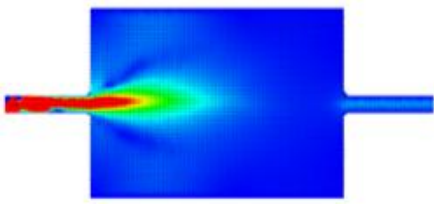
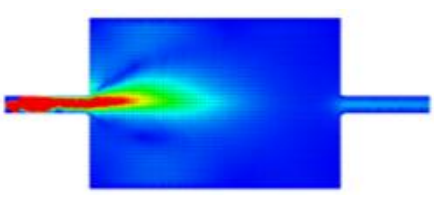
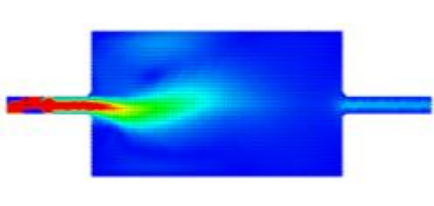
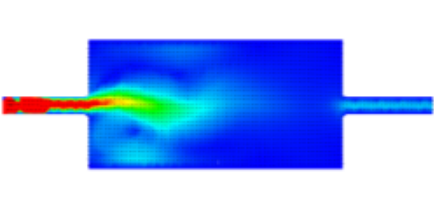
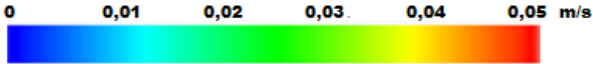
Campo de velocidades	Características de forma
	<p>B = 2,3 m Parâmetro de Forma = 6,6 L/B= 1,3 B/B= 18 I.V.V. = 2,48 Tipo de escoamento: CH-L</p>
	<p>B = 2,2 m Parâmetro de Forma = 6,7 L/B= 1,4 B/B= 18 I.V.V. = 2,71 Tipo de escoamento: CH-L</p>
	<p>B = 2,0 m Parâmetro de Forma = 7,2 L/B= 1,5 B/B= 16 I.V.V. = 4,90 Tipo de escoamento: CH-L</p>
	<p>B = 1,7 m Parâmetro de Forma = 8,0 L/B= 1,8 B/B= 14 I.V.V. = 4,89 Tipo de escoamento: indefinido</p>
	<p>B = 1,5 m Parâmetro de Forma = 8,6 L/B= 2,0 B/B= 12 I.V.V. = 4,97 Tipo de escoamento: indefinido</p>
	<p>Velocidades (m/s)</p>

FIGURA 5.12. - Campos de velocidade para $n=0,070$, $Q = 0,80$ L/s e $b=0,125$ m

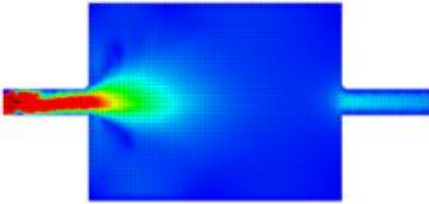
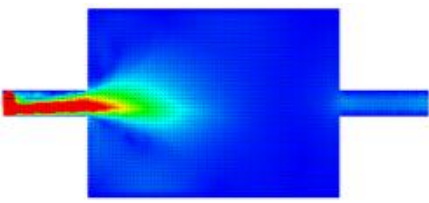
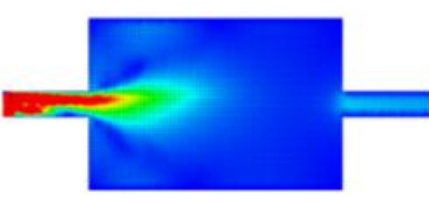
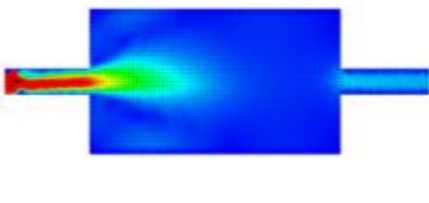
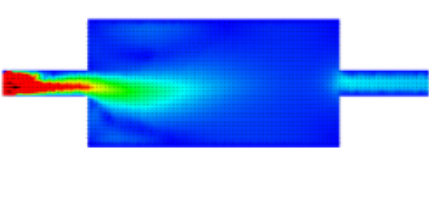
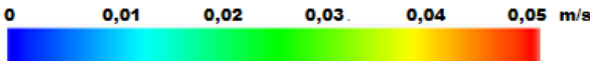
Campo de velocidades	Características de forma
	<p>B = 2,3 m Parâmetro de Forma = 5,5 L/B= 1,3 B/B= 12 I.V.V. = 2,52 Tipo de Escoamento: CH-L</p>
	<p>B = 2,2 m Parâmetro de Forma = 5,7 L/B= 1,4 B/B= 11 I.V.V. = 2,66 Tipo de Escoamento: CH-L</p>
	<p>B = 2,0 m Parâmetro de Forma = 6,1 L/B= 1,5 B/B= 10 I.V.V. = 2,63 Tipo de Escoamento: CH-L</p>
	<p>B = 1,7 m Parâmetro de Forma = 6,8 L/B= 1,8 B/B= 9 I.V.V. = 2,53 Tipo de Escoamento: CH-L</p>
	<p>B = 1,5 m Parâmetro de Forma = 7,4 L/B= 2,0 B/B= 8 I.V.V. = 2,61 Tipo de Escoamento: CH-L</p>
	<p>Velocidades (m/s)</p>

FIGURA 5.13. - Campos de velocidade para $n=0,070$, $Q =0,80$ L/s e $b=0,20$ m

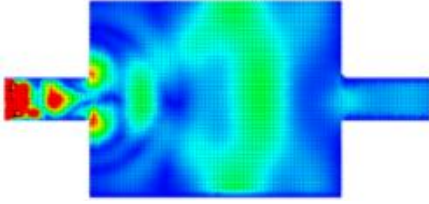
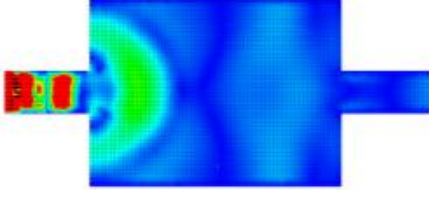
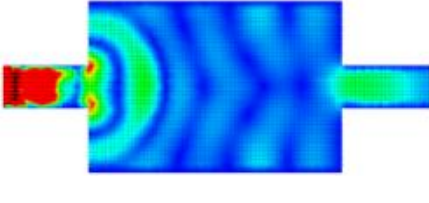
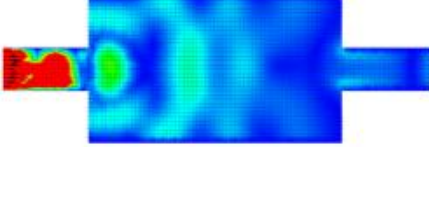
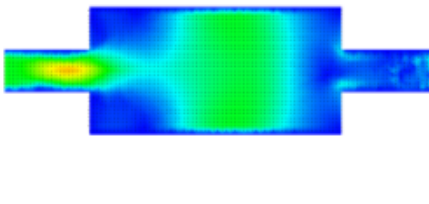
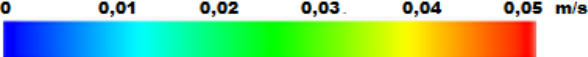
Campo de velocidades	Características de forma
	<p>B = 2,3 m Parâmetro de Forma= 4,5 L/B= 1,3 B/B= 6 I.V.V. = 2,19 Tipo de Escoamento: CH-L</p>
	<p>B = 2,2 m Parâmetro de Forma = 4,6 L/B= 1,4 B/B= 6 I.V.V. = 1,30 Tipo de Escoamento: CH-L</p>
	<p>B = 2,0 m Parâmetro de Forma = 4,9 L/B= 1,5 B/B= 5 I.V.V. = 2,21 Tipo de Escoamento: CH-L</p>
	<p>B = 1,7 m Parâmetro de Forma = 5,6 L/B= 1,8 B/B= 4 I.V.V. = 1,99 Tipo de Escoamento: CH-L</p>
	<p>B = 1,5 m Parâmetro de Forma = 6,2 L/B= 2,0 B/B= 4 I.V.V. = 3,03 Tipo de Escoamento: CH-L</p>
	<p>Velocidades (m/s)</p>

FIGURA 5.14. - Campos de velocidade para $n=0,070$, $Q =0,80$ L/s e $b=0,40$ m

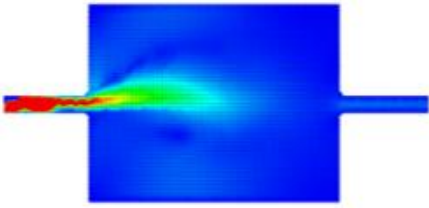
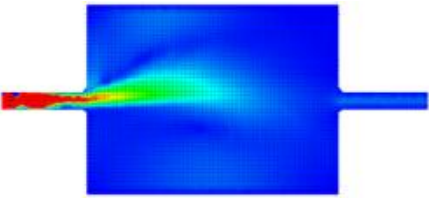
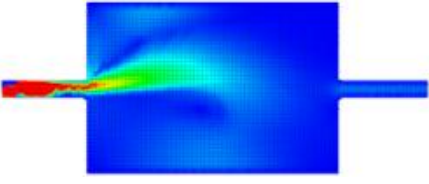
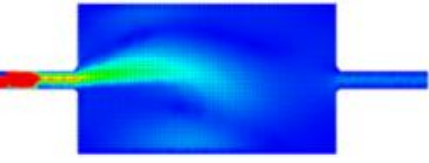
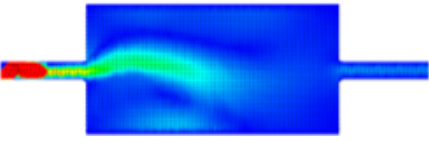
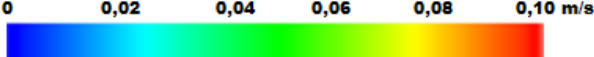
Campo de velocidades	Características de forma
	<p>B = 2,3 m Parâmetro de Forma= 6,6 L/B= 1,3 B/B= 18 I.V.V. = 8,07 Tipo de Escoamento: transição S0/A1</p>
	<p>B = 2,2 m Parâmetro de Forma= 6,7 L/B= 1,4 B/B= 18 I.V.V. = 8,03 Tipo de Escoamento: transição S0/A1</p>
	<p>B = 2,0 m Parâmetro de Forma = 7,2 L/B= 1,5 B/B= 16 I.V.V. = 7,74 Tipo de Escoamento: A2</p>
	<p>B = 1,7 m Parâmetro de Forma = 8,0 L/B= 1,8 B/B= 14 I.V.V. = 7,67 Tipo de Escoamento: A2</p>
	<p>B = 1,5 m Parâmetro de Forma = 8,6 L/B= 2,0 B/B= 12 I.V.V. = 7,97 Tipo de Escoamento: A2</p>
	<p>Velocidades (m/s)</p>

FIGURA 5.15. - Campos de velocidade para $n=0,070$, $Q=1,25$ L/s e $b=0,125$ m

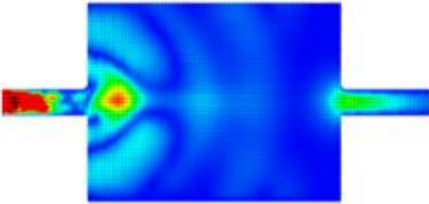
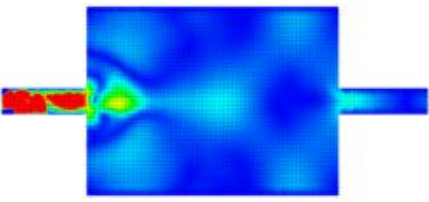
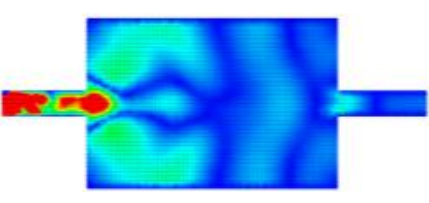
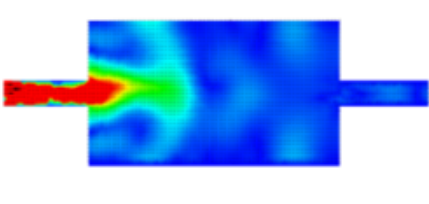
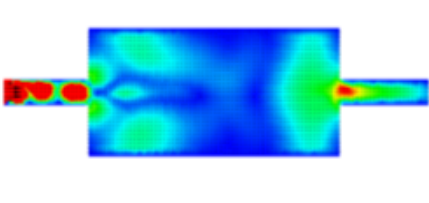
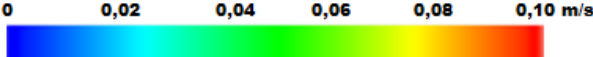
Campo de velocidades	Características de forma
	<p>B = 2,3 m Parâmetro de Forma = 5,5 L/B= 1,3 B/B= 12 I.V.V. = 3,68 Tipo de Escoamento: simétrico</p>
	<p>B = 2,2 m Parâmetro de Forma = 5,7 L/B= 1,4 B/B= 11 I.V.V. = 3,80 Tipo de Escoamento: simétrico</p>
	<p>B = 2,0 m Parâmetro de Forma = 6,1 L/B= 1,5 B/B= 10 I.V.V. = 4,72 Tipo de Escoamento: simétrico</p>
	<p>B = 1,7 m Parâmetro de Forma = 6,8 L/B= 1,8 B/B= 9 I.V.V. = 4,39 Tipo de Escoamento: simétrico</p>
	<p>B = 1,5 m Parâmetro de Forma = 7,4 L/B= 2,0 B/B= 8 I.V.V. = 4,41 Tipo de Escoamento: simétrico</p>
	<p>Velocidades (m/s)</p>

FIGURA 5.16. - Campos de velocidade para $n=0,070$, $Q = 1,25$ L/s e $b=0,20$ m

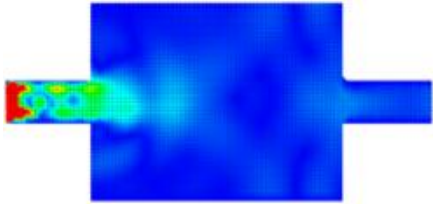
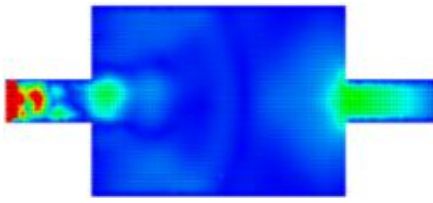
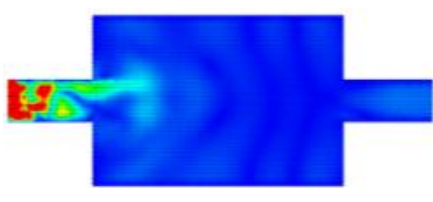
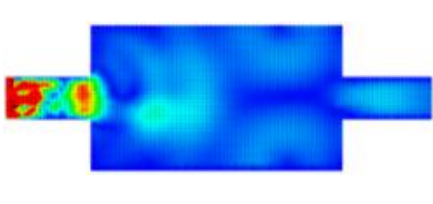
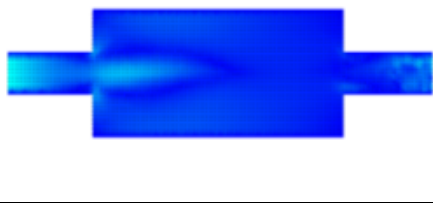
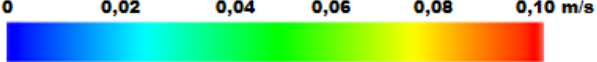
Campo de velocidades	Características de forma
	<p>B = 2,3 m Parâmetro de Forma = 4,5 L/B= 1,3 B/B= 6 I.V.V. = 2,48 Tipo de Escoamento: simétrico</p>
	<p>B = 2,2 m Parâmetro de Forma = 4,6 L/B= 1,4 B/B= 6 I.V.V. = 2,48 Tipo de Escoamento: simétrico</p>
	<p>B = 2,0 m Parâmetro de Forma = 4,9 L/B= 1,5 B/B= 5 I.V.V. = 2,45 Tipo de Escoamento: simétrico</p>
	<p>B = 1,7 m Parâmetro de Forma = 5,6 L/B= 1,8 B/B= 4 I.V.V. = 3,02 Tipo de Escoamento: simétrico</p>
	<p>B = 1,5 m Parâmetro de Forma = 6,2 L/B= 2,0 B/B= 4 I.V.V. = 2,21 Tipo de Escoamento: simétrico</p>
	<p>Velocidades (m/s)</p>

FIGURA 5.17. - Campos de velocidade para $n=0,070$, $Q =1,25$ L/s e $b=0,40$ m

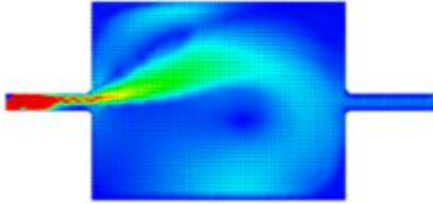
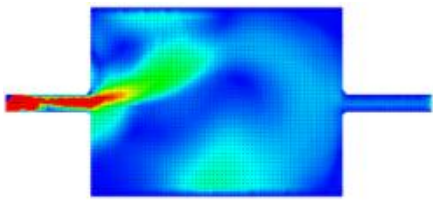
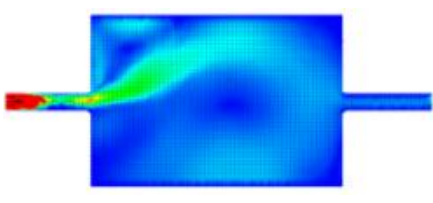
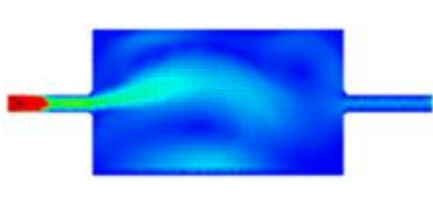
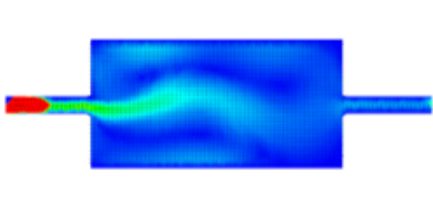
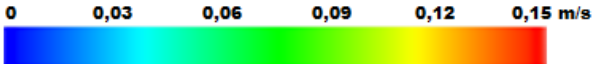
Campo de velocidades	Características de forma
	<p>B = 2,3 m Parâmetro de Forma = 6,6 L/B= 1,3 B/B= 18 I.V.V. = 14,2 Tipo de Escoamento: A1</p>
	<p>B = 2,2 m Parâmetro de Forma = 6,7 L/B= 1,4 B/B= 18 I.V.V. = 13,3 Tipo de Escoamento: A1</p>
	<p>B = 2,0 m Parâmetro de Forma = 7,2 L/B= 1,5 B/B= 16 I.V.V. = 10,0 Tipo de Escoamento: A1</p>
	<p>B = 1,7 m Parâmetro de Forma = 8,0 L/B= 1,8 B/B= 14 I.V.V. = 6,81 Tipo de Escoamento: A2</p>
	<p>B = 1,5 m Parâmetro de Forma = 8,6 L/B= 2,0 B/B= 12 I.V.V. = 4,29 Tipo de Escoamento: A2</p>
	<p>Velocidades (m/s)</p>

FIGURA 5.18. - Campos de velocidade para $n=0,070$, $Q = 3,5$ L/s e $b=0,125$ m

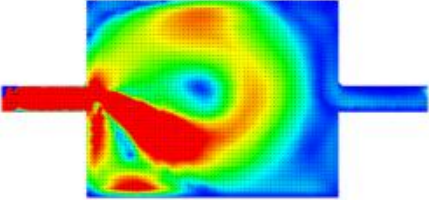
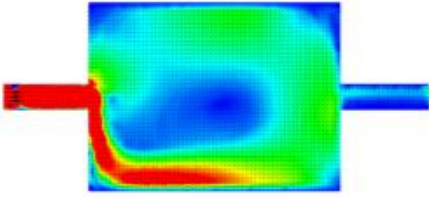
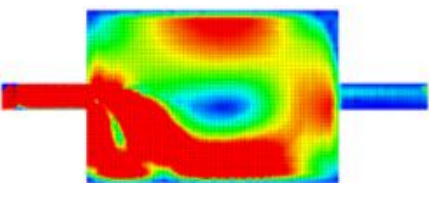
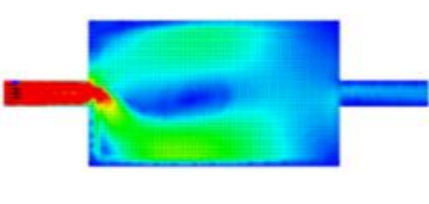
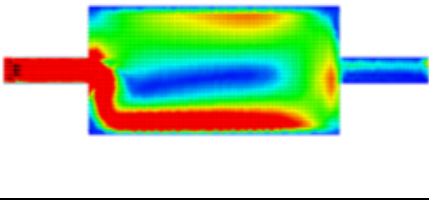
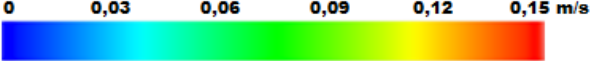
Campo de velocidades	Características de forma
	<p>B = 2,3 m Parâmetro de Forma = 5,5 L/B= 1,3 B/B= 12 I.V.V. = 19,7 Tipo de escoamento: A2</p>
	<p>B = 2,2 m Parâmetro de Forma = 5,7 L/B= 1,4 B/B= 11 I.V.V. = 18,6 Tipo de escoamento: A1</p>
	<p>B = 2,0 m Parâmetro de Forma = 6,1 L/B= 1,5 B/B= 10 I.V.V. = 24,7 Tipo de escoamento: A1</p>
	<p>B = 1,7 m Parâmetro de Forma = 6,8 L/B= 1,8 B/B= 9 I.V.V. = 12,1 Tipo de escoamento: A2</p>
	<p>B = 1,5 m Parâmetro de Forma = 7,4 L/B= 2,0 B/B= 8 I.V.V. = 20,8 Tipo de escoamento: A1</p>
	<p>Velocidades (m/s)</p>

FIGURA 5.19. - Campos de velocidade para $n=0,070$, $Q = 3,5$ L/s e $b=0,20$ m

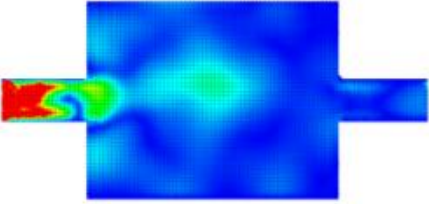
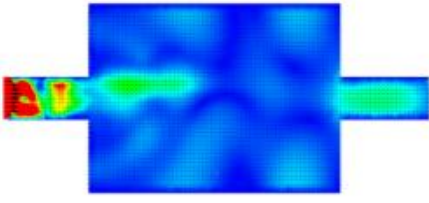
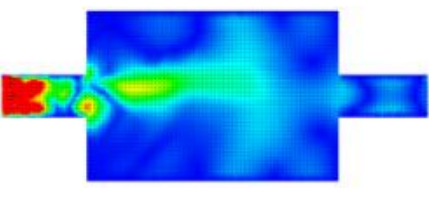
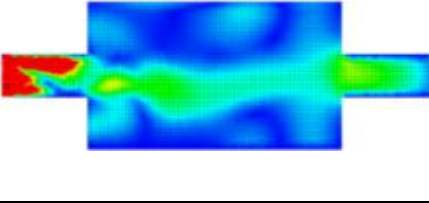
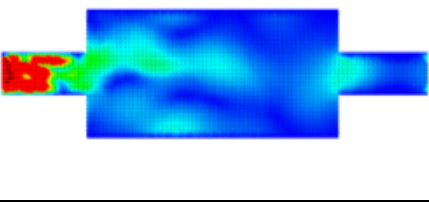
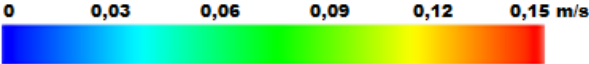
Campo de velocidades	Características de forma
	B = 2,3 m Parâmetro de Forma = 4,5 L/B= 1,3 B/B= 6 I.V.V. = 5,72 Tipo de Escoamento: S0
	B = 2,2 m Parâmetro de Forma = 4,6 L/B= 1,4 B/B= 6 I.V.V. = 7,92 Tipo de Escoamento: S0
	B = 2,0 m Parâmetro de Forma = 4,9 L/B= 1,5 B/B= 5 I.V.V. = 7,56 Tipo de Escoamento: transição S0/A1
	B = 1,7 m Parâmetro de Forma = 5,6 L/B= 1,8 B/B= 4 I.V.V. = 9,87 Tipo de Escoamento: transição S0/A1
	B = 1,5 m Parâmetro de Forma = 6,2 L/B= 2,0 B/B= 4 I.V.V. = 6,77 Tipo de Escoamento: transição S0/A1
	Velocidades (m/s)

FIGURA 5.20. - Campos de velocidade para $n=0,070$, $Q = 3,5$ L/s e $b=0,40$ m

Na FIGURA 5.21 são mostrados os resultados obtidos. Cada série corresponde a 15 configurações geométricas de rugosidade e vazão. As séries em azul correspondem a rugosidades de $n = 0,025$ e as séries em vermelho correspondem a rugosidades de $n = 0,070$.

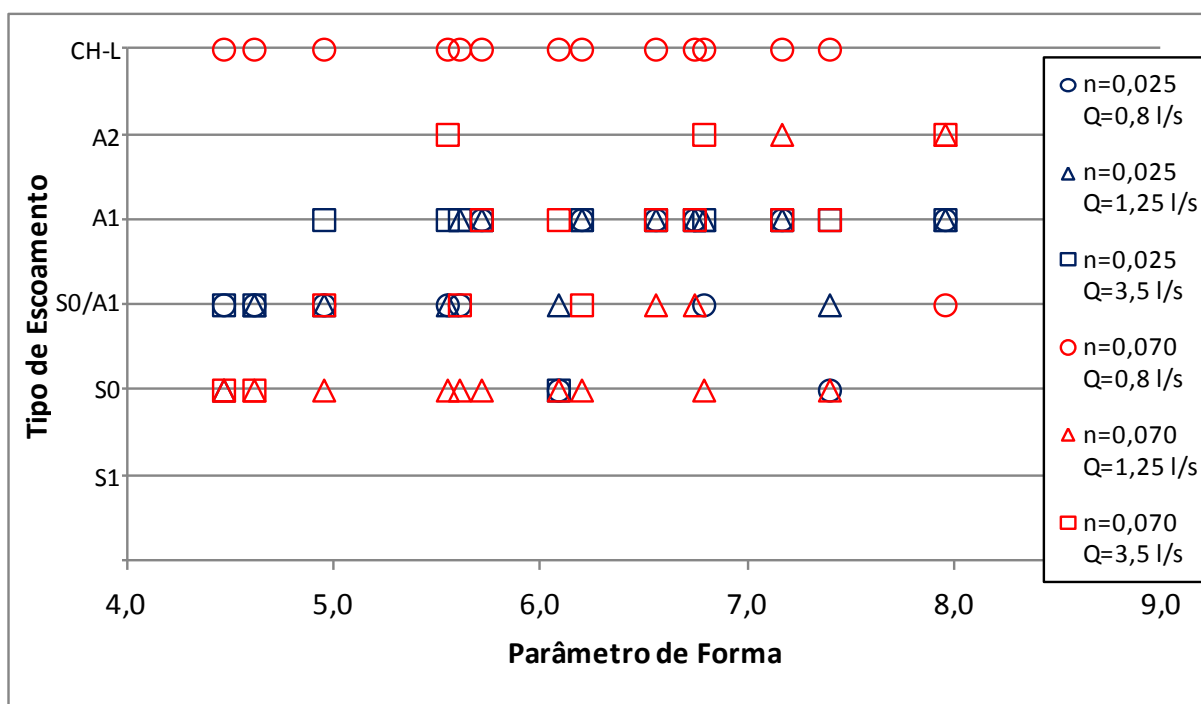


FIGURA 5.21. - Padrões de escoamento em função do *parâmetro de forma*

Como se pode perceber na FIGURA 5.21, e na Tabela 5.1 para valores de *parâmetro de forma* acima de 7 se observa a formação de apenas dois escoamentos simétricos, em conformidade com o postulado por Peltier *et al.* (2014a).

Tabela 5.1. – Frequência de ocorrência dos tipos de escoamento em função dos *parâmetros de forma*

<i>Parâmetro de Forma</i>	Simétrico	Assimétrico	Transição	Total
4,0 a 5,0	6	1	8	15
5,0 a 6,0	3	8	4	15
6,0 a 7,0	5	15	5	25
7,0 a 8,6	2	17	3	22

Na FIGURA 5.22 são comparados os tipos de escoamento formado e os valores de *taxa de aspecto* das bacias. Verifica-se que este parâmetro é insuficiente para definir a conformação do escoamento, uma vez que se observa a formação de escoamentos simétricos (S0) e assimétricos (A1, A2) para cada uma das cinco taxas de aspecto testadas. Como mostrado na

FIGURA 3.14, as taxas de aspectos que podem levar aos parâmetros de forma entre 6 e 7 (onde se verifica passagem do escoamento simétrico para assimétrico) são aqueles próximos a 2.

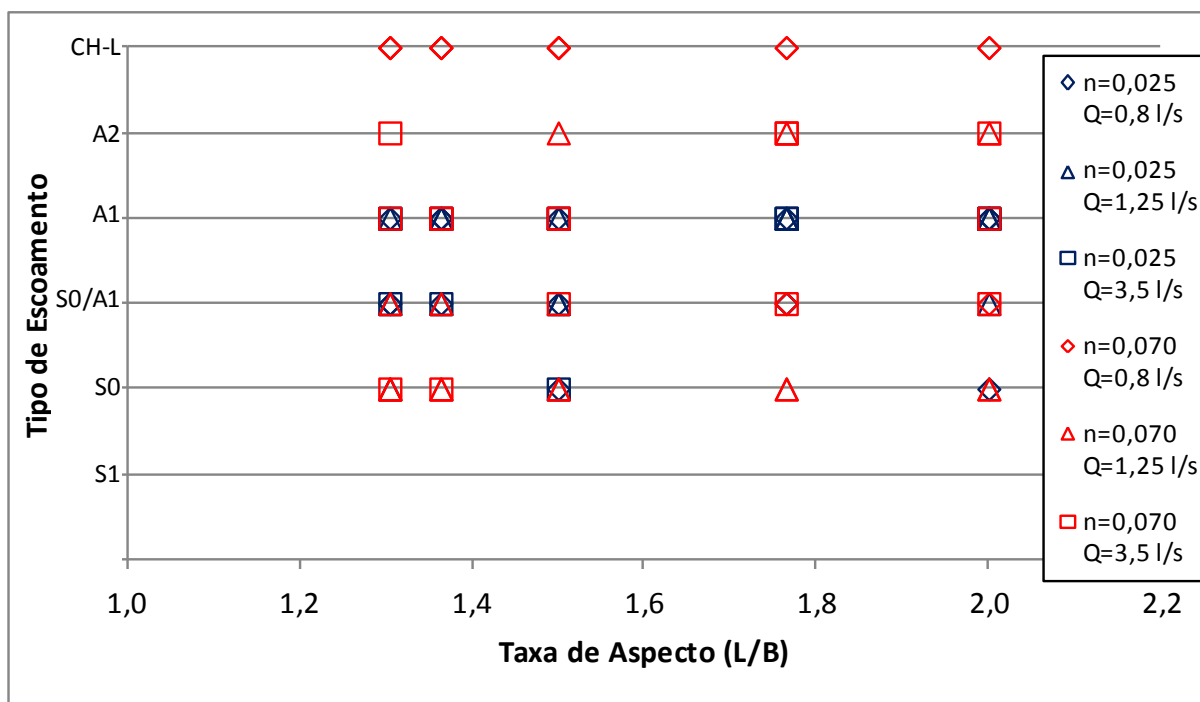


FIGURA 5.22. - Padrões de escoamento em função da taxa de aspecto

Na FIGURA 5.23 é exibida a comparação entre a taxa de expansão e o tipo de escoamento formado. Verifica-se que para taxas de expansão acima de 12 não ocorre escoamento simétrico, exceto para vazões de 0,8 L/s e coeficiente de Manning de 0,070. Este fato pode ser explicado pela maior relevância da rugosidade para menores profundidades de escoamento, impedindo que sejam formados padrões assimétricos de escoamento.

Em outras palavras, pode-se supor que a velocidade do escoamento teria apenas em seu componente paralelo ao comprimento da bacia magnitude suficiente para vencer as forças de atrito existentes na bacia.

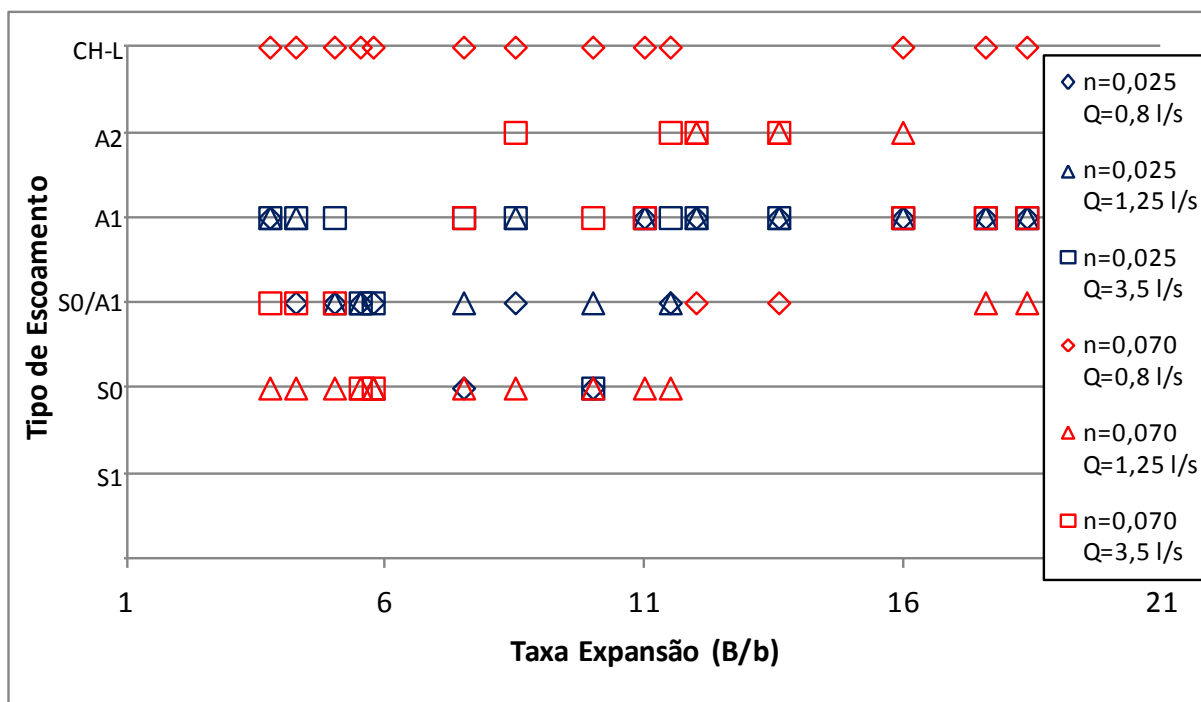


FIGURA 5.23. - Padrões de escoamento em função da *taxa de expansão*

De modo a verificar a relevância da velocidade do vórtice no regime de escoamento se estuda a frequência de ocorrência dos diferentes tipos de escoamentos em função do índice de Velocidade do Vórtice, como mostrado na FIGURA 5.1.

Tabela 5.2. – Frequência de ocorrência dos tipos de escoamento em função do Índice de Velocidade do Vórtice (IVV)

Índice de Velocidade do Vórtice	Simétrico	Assimétrico	Transição	Total
1,0 - 9,0	15	24	17	56
9,0 – 15,0	1	13	3	17
15,0 a 19,0	0	1	0	1
19,0 a 25,0	0	3	0	3

Observa-se que a maior parte dos escoamentos com IVV acima de 9 são assimétricos. Este fato permite supor que os escoamentos assimétricos apresentam uma velocidade de vórtice maior em relação aos simétricos. Esta suposição é interessante, pois o vórtice de um escoamento assimétrico apresenta um comprimento maior que o caminho preferencial de um escoamento simétrico. Deste modo, um escoamento assimétrico vence uma resistência maior

e parece apresentar uma velocidade maior que o simétrico. A perda de eficiência de retenção de sólidos para escoamentos assimétricos relatada por Khantoush (2008) poderia ser explicada pelo mesmo fenômeno.

A FIGURA 5.24 contém a relação IVV e *Parâmetro de Forma*. De acordo com esta, não se destaca nenhum valor de *parâmetro de forma* para a geração de grandes IVV.

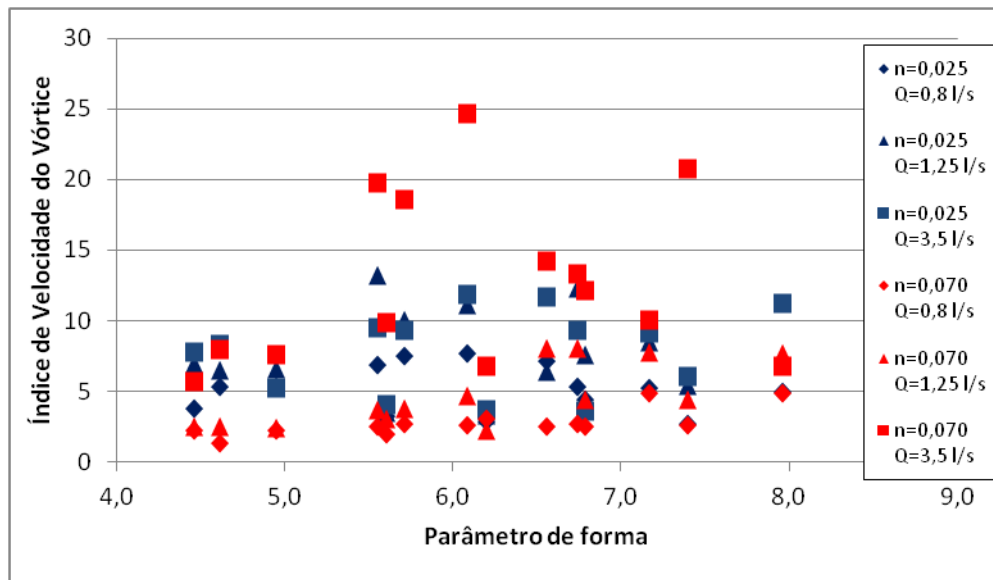


FIGURA 5.24. – Índice de velocidade do vórtice em função do *parâmetro de forma*

De maneira similar à FIGURA 3.9, compara-se os resultados obtidos em função do *parâmetro de forma* e do número de Froude na FIGURA 5.25.

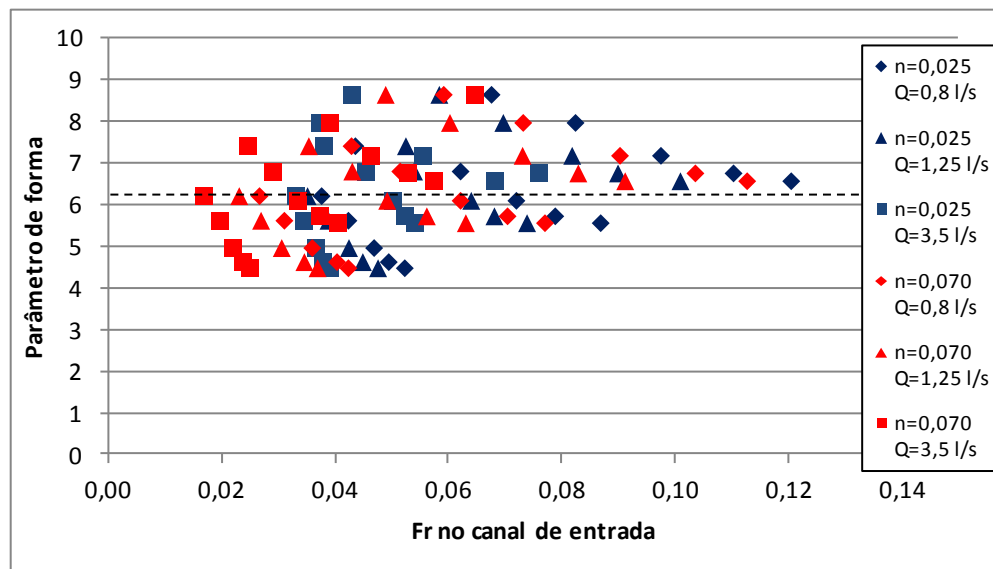


FIGURA 5.25. – *Parâmetro de forma* em função do número de Froude

Observa-se que o alcance dos cenários simulados não é tão grande como o de Peltier *et al.*, 2014a.

5.2 Influência de parâmetros hidráulicos na conformação campo de velocidades

Os modelos numéricos foram gerados para cada uma das quinze geometrias definidas no item 4.1.6. Estas foram simuladas por 10 minutos para as vazões de 0,8 L/s, 1,25 L/s, 3,5 L/s, com uma rugosidade equivalente ao coeficiente de Manning de 0,025 e 0,070.

Na FIGURA 5.26 observa-se que os valores de número de Froude dos canais de entrada testados não apresentam correlação com o tipo de escoamento formado: todas as faixas de valor apresentam pelo menos um escoamento simétrico (S0, CH-L) e assimétrico (A1/A2) correspondente. Este fato não permite inferir influência do número de Froude no tipo de escoamento para a faixa analisada.

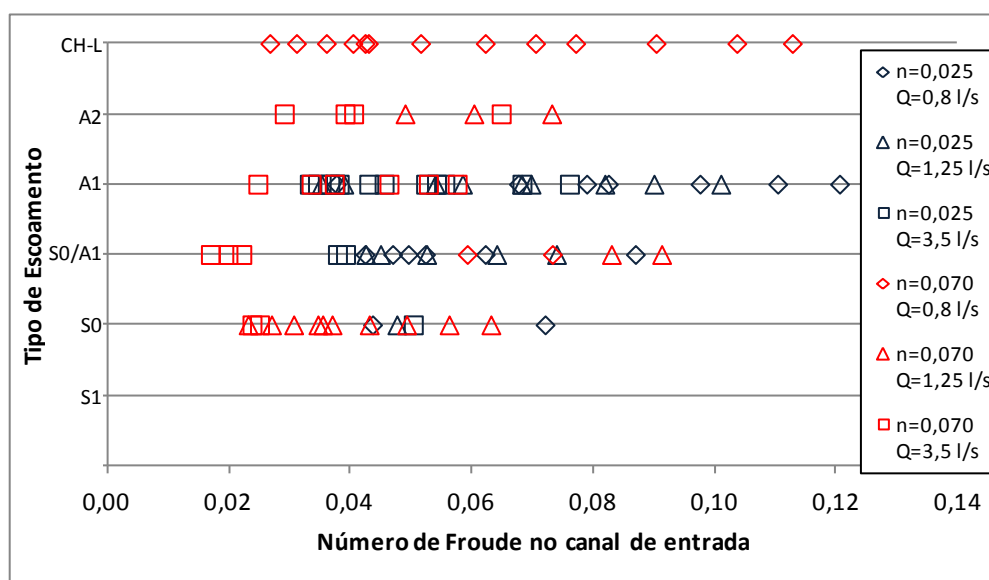


FIGURA 5.26. - Padrões de escoamento em relação ao número de Froude

Cabe ressaltar que os valores do número de Froude aqui considerados são muito baixos. Valores próximos e acima da unidade poderiam revelar uma correlação entre este parâmetro e o tipo de escoamento formado. Entretanto, para se obter números de Froude maiores se faz necessário aumentar a declividade longitudinal do canal de entrada da bacia.

Como se pode observar na FIGURA 5.27, o número de Reynolds na bacia parece influenciar o índice de velocidade do vórtice (IVV) – quando maior a turbulência do escoamento, maior o IVV. Esta relação parece lógica, uma vez que os escoamentos com maior IVV possuem uma maior velocidade e por consequência, um maior número de Reynolds. Na mesma figura

podemos observar que os ensaios para vazões de 0,8 L/s, 1,25 L/s e 3,5 L/s são laminares, transição e turbulentos – pois se encontram nas faixas de $0 < Re < 500$, $500 < Re < 1000$ e $Re > 1000$, respectivamente.

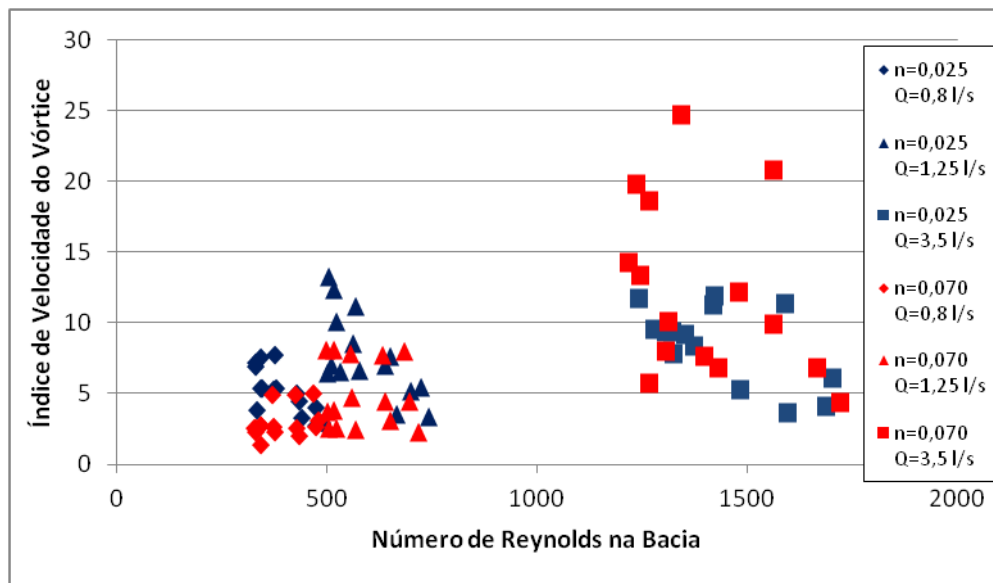


FIGURA 5.27. – IVV em função do número de Reynolds na bacia

Em relação ao número de Reynolds no canal de entrada, percebe-se que todos os escoamentos são turbulentos, e o IVV aumenta na mesma proporção que o número de Reynolds, como mostrado na FIGURA 5.28.

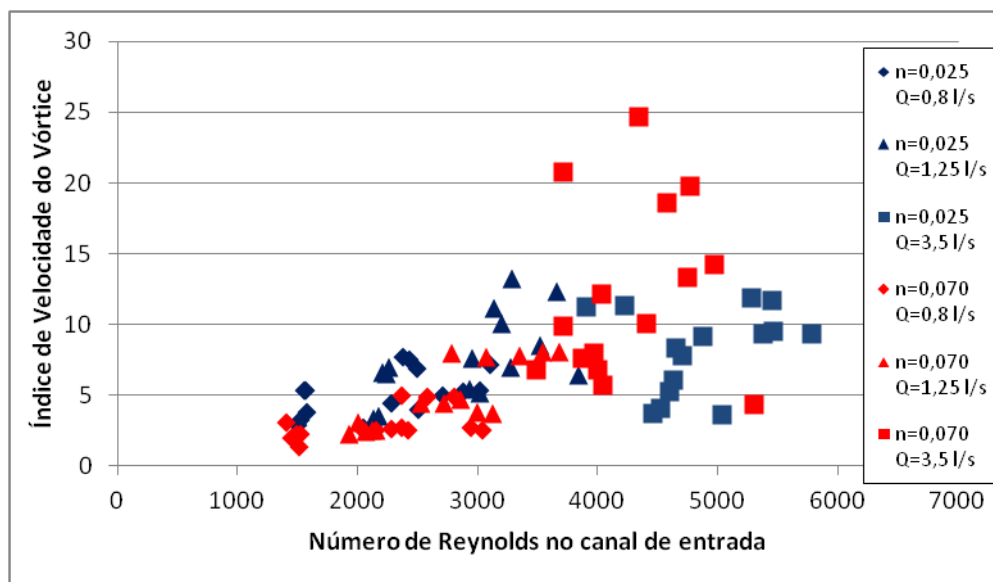


FIGURA 5.28. – IVV em função do número de Reynolds no canal de entrada

Na FIGURA 5.29 é mostrada a relação entre o IVV e o número de Froude. Nota-se uma tendência inversa da relação entre os dois parâmetros.

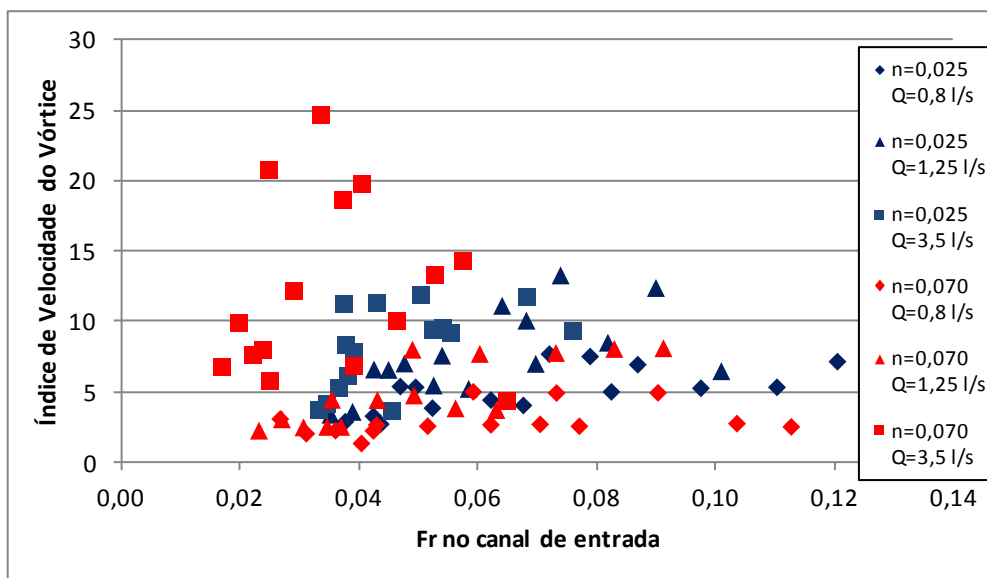


FIGURA 5.29. – IVV em função do número de Froude

Na FIGURA 5.30 são comparados os diferentes tipos de escoamento formados em função de seu IVV, observa-se que os maiores valores de IVV correspondem a escoamentos assimétricos, como mostrado na Tabela 5.2.

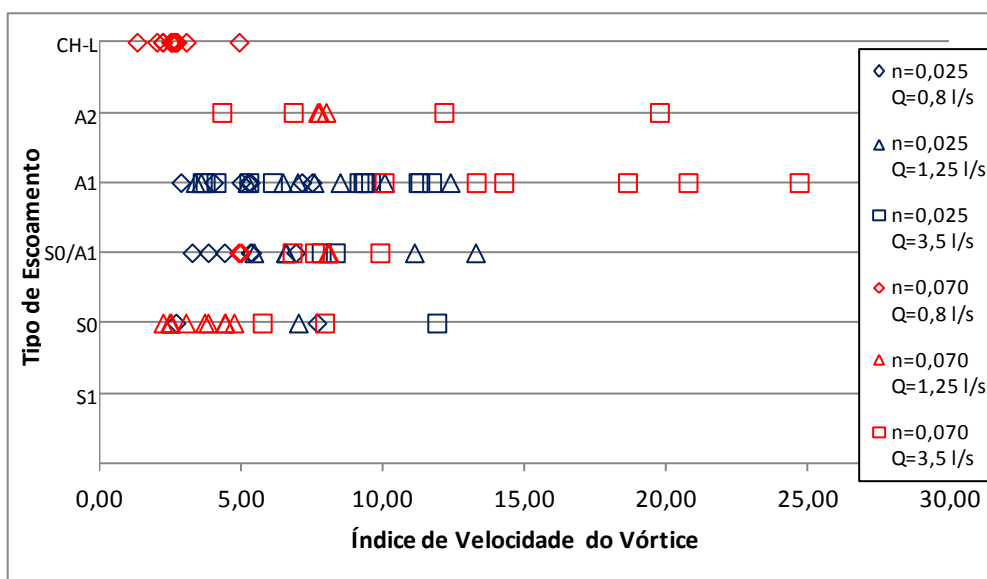


FIGURA 5.30. – Tipo de Escoamento formado em função do IVV

Na FIGURA 5.31 são comparados os diferentes tipos de escoamento formados em função de seu tempo de detenção na bacia, sendo este parâmetro é calculado pela razão entre o volume da bacia e a vazão de entrada. Observa-se que os três menores tempos de detenção correspondem a escoamentos assimétricos.

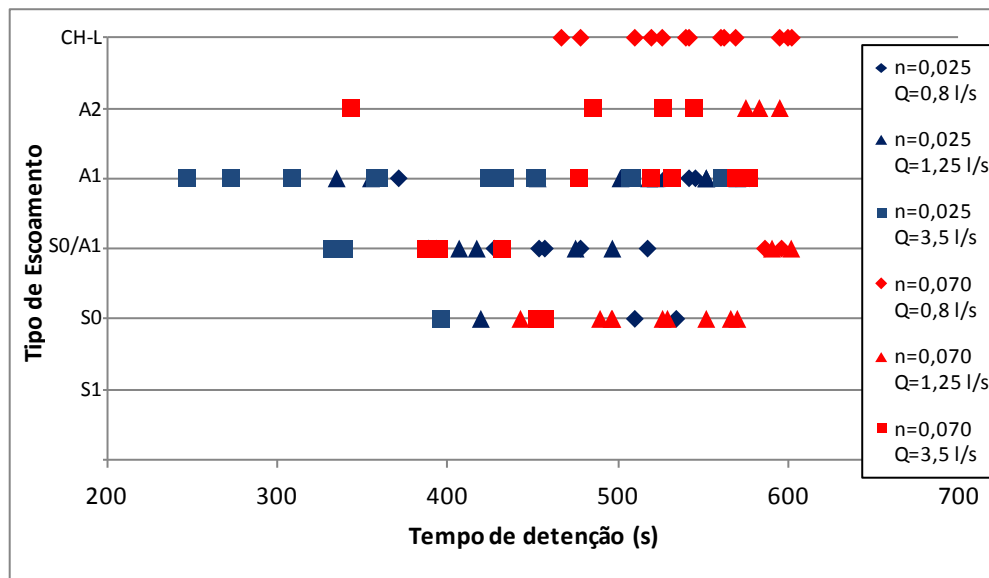


FIGURA 5.31. - Padrões de escoamento em função do tempo de detenção

Na FIGURA 5.32 são comparados os diferentes valores de número de Reynolds da bacia em cada simulação e o tipo de escoamento observado. Não é apreciável qualquer correlação entre o número de Reynolds e o tipo de escoamento formado. O mesmo se observa para os valores do número de Reynolds no canal de entrada na bacia, como mostrado na FIGURA 5.33.

Entretanto, observa-se que o apenas as simulações com vazão de 3,5 L/s, representadas como quadrado no gráfico, apresentaram-se como escoamento turbulento ($Re > 1000$). Este fato indica que estas simulações talvez devam ser avaliadas separadamente de modo a caracterizar a relação entre as demais variáveis e tipo de escoamento produzido.

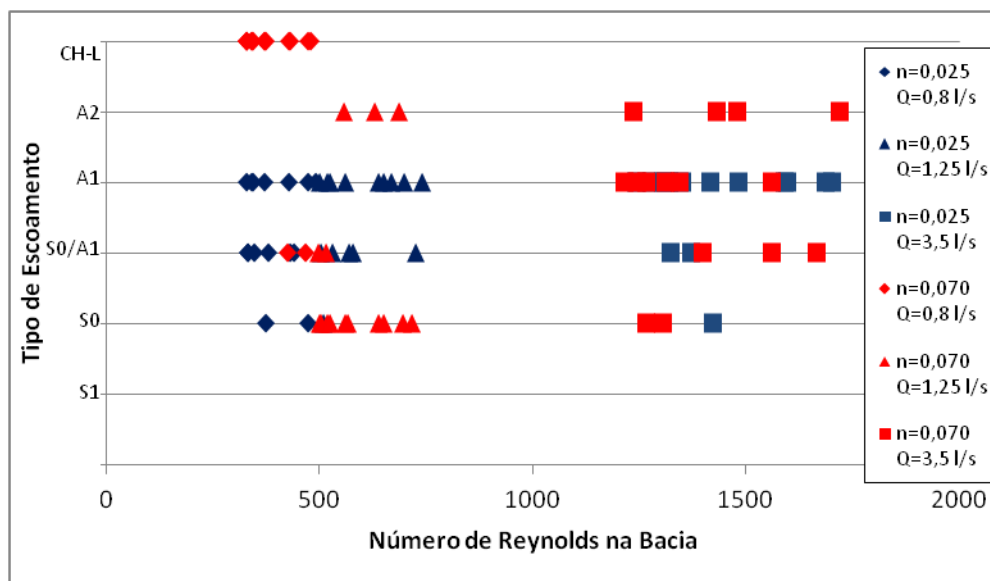


FIGURA 5.32. - Padrões de escoamento em função do número de Reynolds na bacia

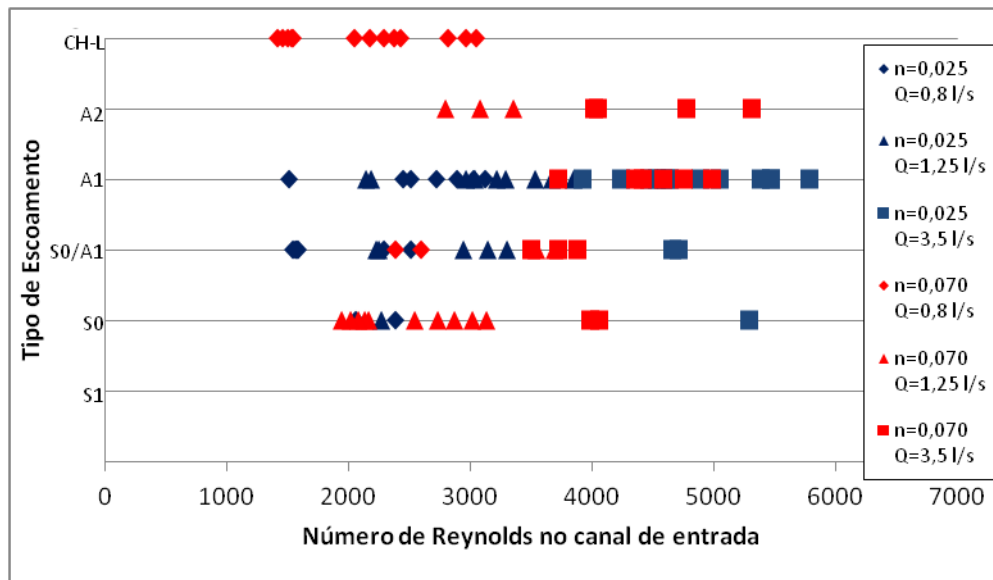


FIGURA 5.33. - Padrões de escoamento em função do número de Reynolds no canal de entrada

A rugosidade de $n=0,070$ e de $n=0,025$ parecem afetar de maneira semelhante o tipo de escoamento formado para a vazão de 3,5 L/s, em que o escoamento é turbulento. Exceção foi encontrada para $B=2,0$ m e $b=0,20$, onde o escoamento foi do tipo S0 para $n=0,025$ e A1 encontrada para $n=0,070$.

Para as vazões mais baixas e a rugosidade mais elevada ($n=0,070$) onde se verifica regime laminar e de transição na bacia para vazões de 0,8L/s e 1,25L/s, respectivamente, o escoamento não se desenvolveu plenamente, o que prejudicou a visualização.

5.3 Avaliação dos parâmetros geométricos e hidráulicos para escoamentos turbulentos

De modo a determinar os limites dos parâmetros que definem a conformação do campo de velocidades, avalia-se apenas os resultados dos itens 5.1.3 e 5.2 que apresentaram escoamento turbulento na bacia ($Re > 1000$).

É apresentada na FIGURA 5.34 a relação entre os padrões de escoamento e o *parâmetro de forma* para escoamentos turbulentos. Percebe-se que para valores de *parâmetro de forma* superiores a 6,2 há a formação de escoamentos assimétricos para todas as rugosidades de fundo, enquanto para valores de *parâmetro de forma* abaixo deste valor verifica-se a existência de escoamentos simétricos como assimétricos para ambas as rugosidades.

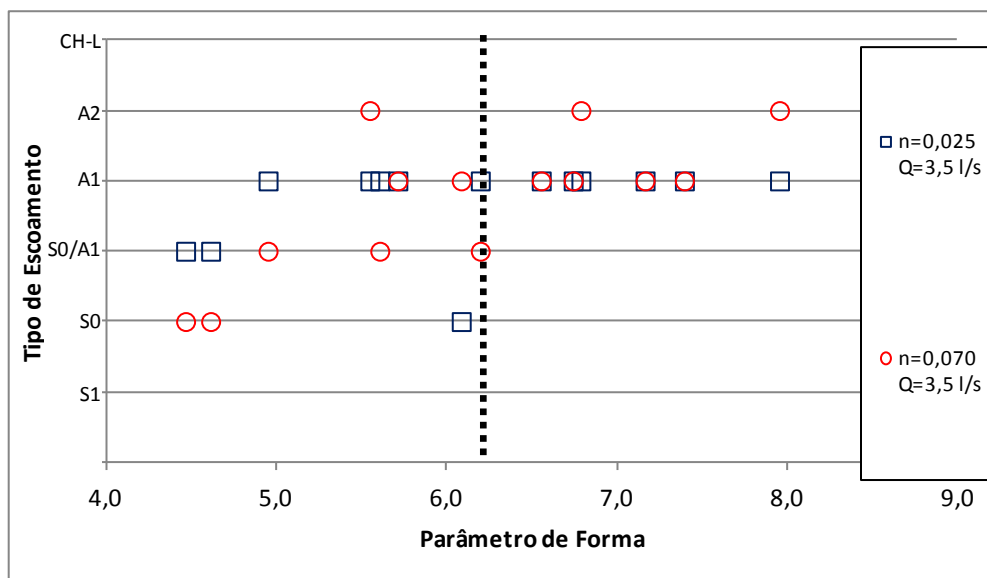


FIGURA 5.34. - Padrões de escoamento em função do *parâmetro de forma* para escoamento turbulento

Na FIGURA 5.35 se observa a relação entre os padrões de escoamento e a *taxa de expansão* para escoamentos turbulentos. Percebe-se que apenas escoamentos assimétricos se apresentam para valores de *taxa de expansão* superiores a 10.

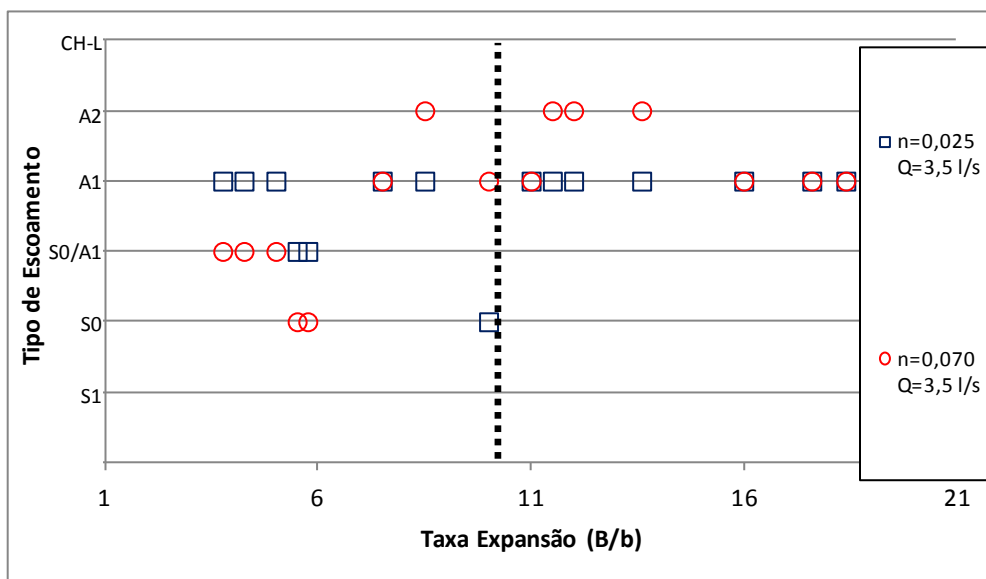


FIGURA 5.35. - Padrões de escoamento em função da *taxa de expansão* para escoamento turbulento

De posse das informações acima é possível estabelecer um conjunto de condições geométricas e hidráulicas para as quais o escoamento deve ser assimétrico. Vale ressaltar que segundo Kantoush, 2008, o escoamento assimétrico não favorece a deposição de sedimentos.

Assim, para projetos de bacias rasas retangulares em que se queira a minimização de depósito de sedimentos por meio do estabelecimento de escoamento assimétrico, as seguintes condições são necessárias:

- Escoamento turbulento na bacia, ou seja, $Re > 1000$;
- *Parâmetro de forma* igual ou superior a 6,2;
- *Taxa de expansão* (B/b) igual ou superior a 10.

5.4 Avaliação experimental dos cenários de interesse

O modelo físico construído no Centro de Pesquisas Hidráulicas da UFMG, mostrado na FIGURA 5.36, possui as características geométricas para o *parâmetro de forma* 7,2 presente na Tabela 4.2. Foram testadas experimentalmente as vazões de 0,5 L/s, 1,25L/s e 3,4 L/s, que diferem das vazões de 0,8 L/s, 1,25L/s e 3,5 L/s testadas numericamente no capítulo 5.1.3. Por esta razão, de modo a comparar as simulações numéricas e os ensaios de laboratório com a maior precisão possível, simularam-se também as condições de vazão de 0,5 L/s; 1,25 L/s e 3,4 L/s e rugosidade de $n=0,012$ verificadas no modelo numérico.

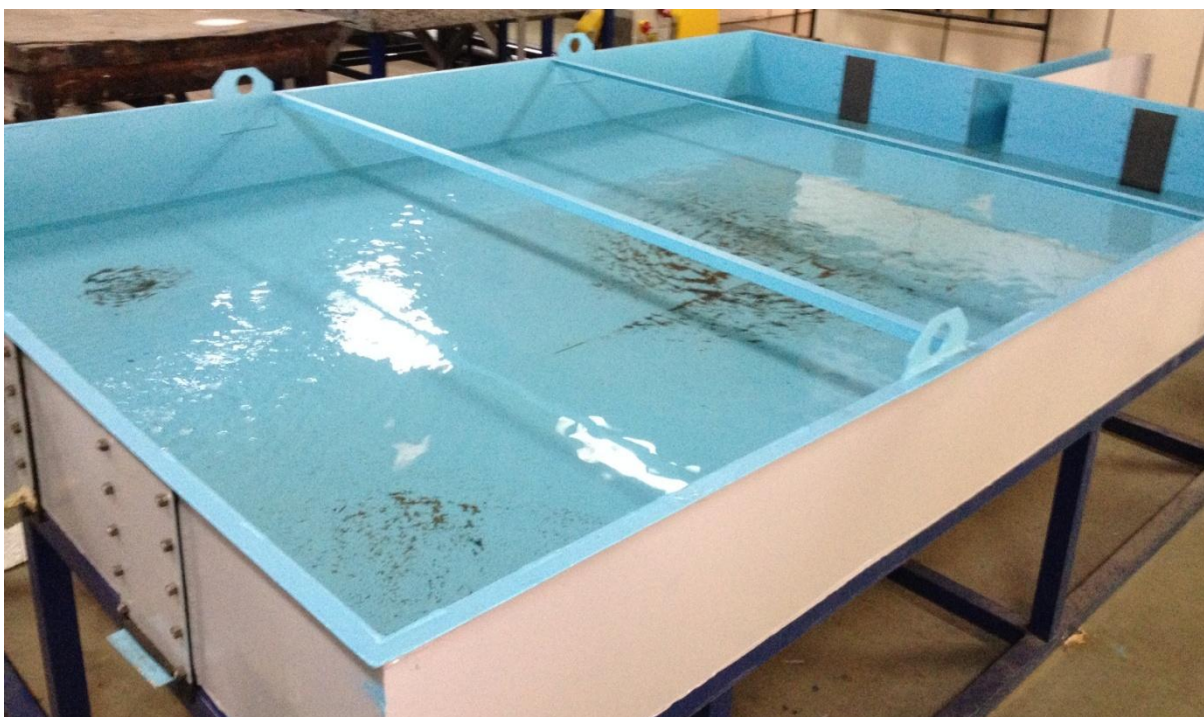


FIGURA 5.36. – Modelo físico implantado no Centro de Pesquisas Hidráulicas

Na FIGURA 5.37, na FIGURA 5.38 e na FIGURA 5.39 são mostrados os resultados de formação de campos de velocidade para o modelo físico e numérico, todos para vazão de 0,5 L/s. Para avaliar a presença (ou não) de histerese nos experimentos, os ensaios foram realizados inicialmente a partir da vazão zero até alcançar 0,5 L/s (FIGURA 5.37) e no outro ensaio, a partir de uma vazão superior e depois reduzida a 0,5 L/s (FIGURA 5.38). Nas simulações numéricas foi feita a suposição de enchimento da bacia, uma vez que ela se encontra seca no início de cada simulação.

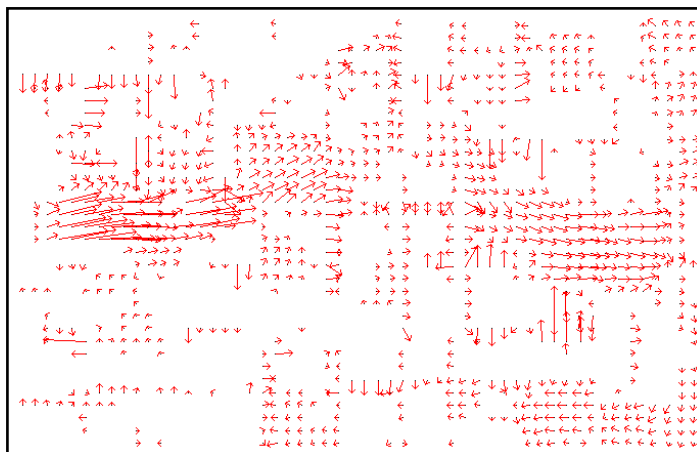


FIGURA 5.37. - Padrões de escoamento do modelo físico para vazão crescente de 0,5 L/s

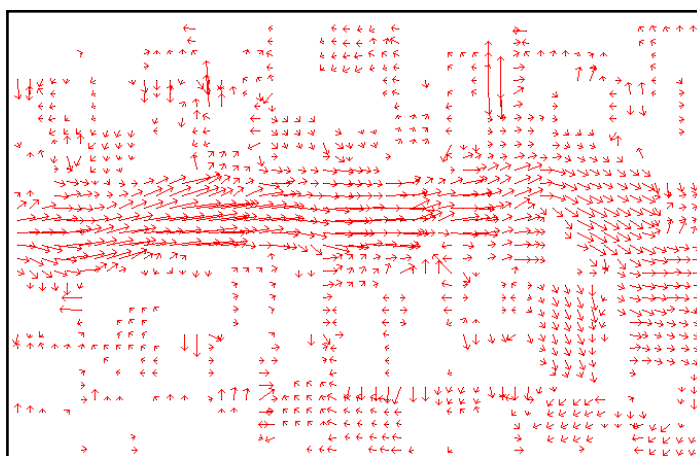


FIGURA 5.38. - Padrões de escoamento do modelo físico para vazão decrescente de 0,5 L/s

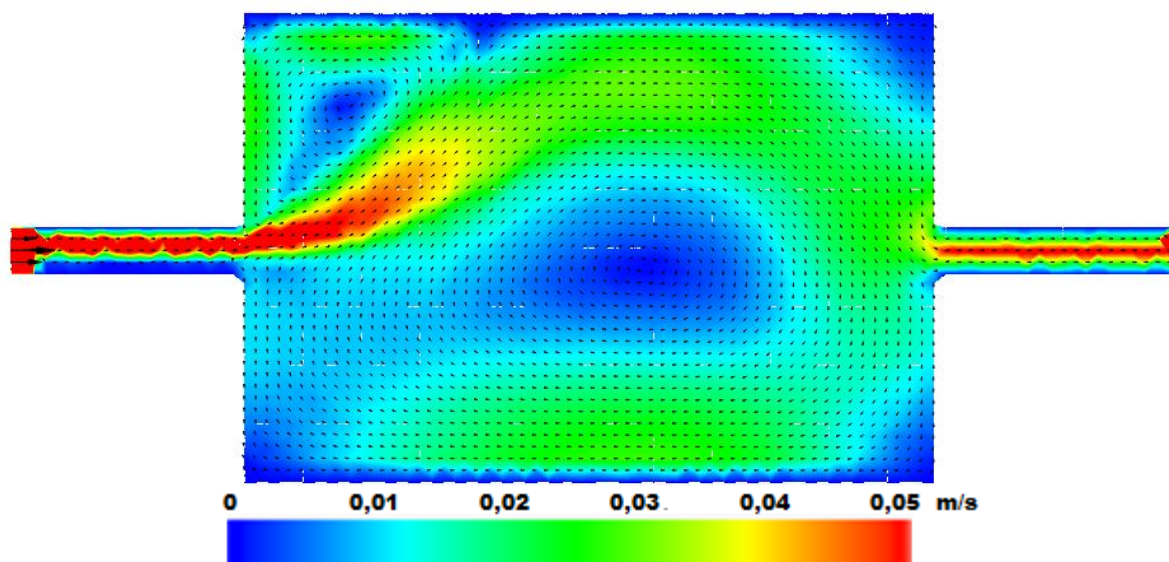


FIGURA 5.39. - Padrões de escoamento do modelo numérico para vazão de 0,5 L/s

Observa-se que para a vazão de 0,5 L/s o modelo numérico apresenta um escoamento assimétrico de contorno mal definido, enquanto o modelo numérico apresenta um vórtice claro e que contorna toda a bacia. Não se observaram diferenças significativas entre o padrão de escoamento para vazões crescentes e decrescentes. Para os ensaios de laboratório, verifica-se que a discretização dos elementos (flutuadores) não permite uma exibição contínua ao longo da bacia.

Na FIGURA 5.40 FIGURA 5.41 e na FIGURA 5.42 são mostrados os resultados de formação de campos de velocidade para o modelo físico e numérico, respectivamente, para vazão de 1,25 L/s.

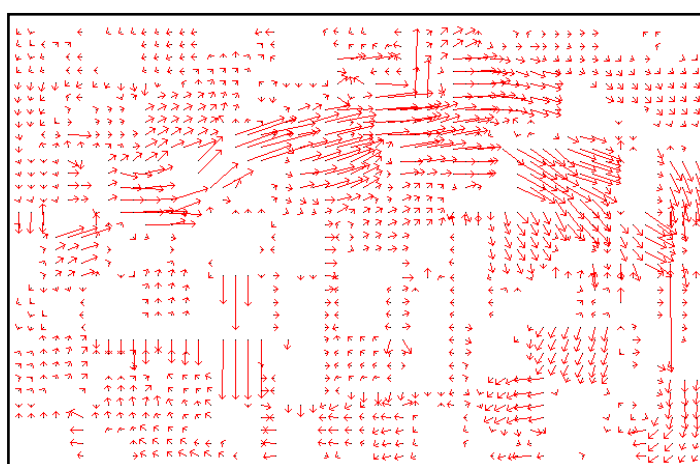


FIGURA 5.40. - Padrões de escoamento do modelo físico para vazão crescente de 1,25 L/s

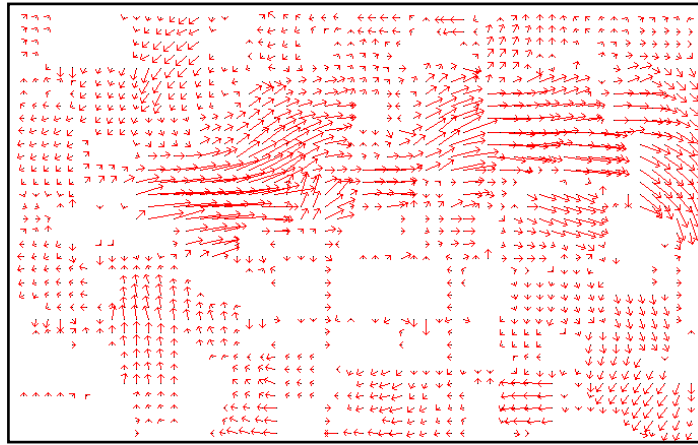


FIGURA 5.41. - Padrões de escoamento do modelo físico para vazão decrescente de 1,25 L/s

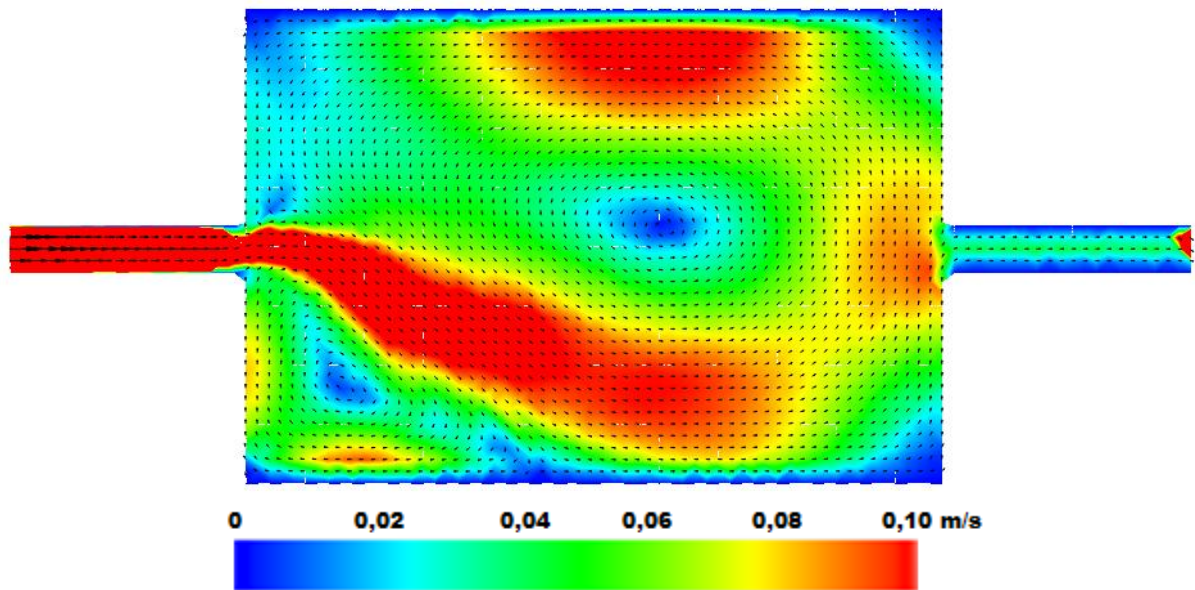


FIGURA 5.42. - Padrões de escoamento do modelo numérico para vazão de 1,25 L/s

Observa-se que para a vazão de 1,25 L/s o modelo numérico apresenta um escoamento assimétrico parecido ao do modelo físico. É notável que esta similaridade se aplique tanto para vazões crescentes e decrescentes e que o fenômeno da histerese não se apresenta.

Na FIGURA 5.43 e na FIGURA 5.44 são mostrados os resultados de formação de campos de velocidade para o modelo físico e numérico, respectivamente para vazão de 3,4 L/s.



FIGURA 5.43. - Padrões de escoamento do modelo físico para vazão crescente de 3,4 L/s

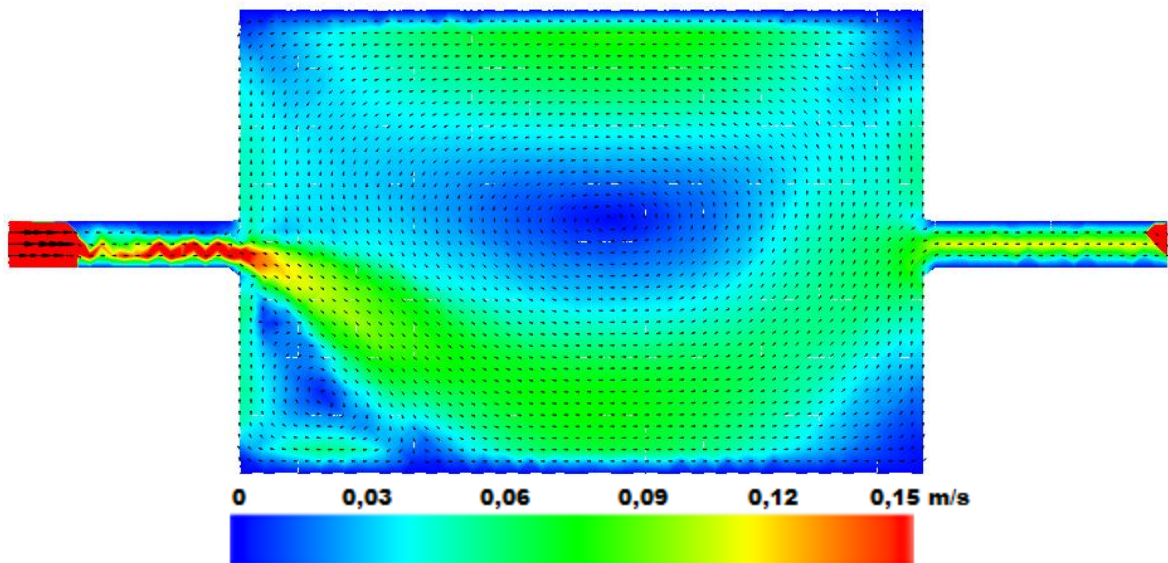


FIGURA 5.44. - Padrões de escoamento do modelo numérico para vazão crescente de 3,4 L/s

Observa-se que para a vazão de 3,4 L/s o modelo numérico apresenta um escoamento assimétrico do mesmo modo que o modelo físico. Contudo, chama à atenção a formação de escoamento assimétrico, que ocorreu com o vórtice no lado norte da bacia para o modelo físico enquanto o modelo experimental apresentou o comportamento oposto.

Verifica-se que para duas das vazões testadas houve concordância da conformação do campo de velocidades nas simulações numéricas e experimentais. A vazão de 0,5 L/s (única com escoamento laminar na bacia) apresentou uma discrepância sugerindo que o programa Basement não seja adequado para representar escoamentos com número de Reynolds inferiores a 500.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Considerando o objetivo deste trabalho, foi avaliada a conformação do campo de velocidades em bacias rasas em relação às características geométricas e às condições hidráulicas do escoamento. Maior atenção foi dada à formação dos escoamentos simétricos e assimétricos, tendo em vista a sua importância na maximização ou minimização da deposição dos sedimentos, respectivamente segundo Kantoush (2008). A seguir são apresentados os principais aspectos dos resultados obtidos

6.1 Influência do parâmetro de forma na conformação do campo de velocidades de bacias rasas

A análise preliminar da influência do *parâmetro de forma* na conformação do campo de velocidades de bacias rasas foi realizada em duas etapas. Na primeira, foi verificada a representatividade do modelo numérico (Basement), tendo por base os resultados experimentais de Kantoush *et al.* (2007) e Dewals *et al.* (2008). Nesta etapa foi verificado que o modelo hidráulico Basement emulou adequadamente o tipo de escoamento dos pesquisadores anteriormente citados, ocorrendo escoamentos do tipo assimétrico para o *fator de forma* 7,2 e simétrico para o fator de forma 6,0.

Uma vez validada a representatividade do modelo hidráulico para análise do tipo de escoamento em bacias rasas na primeira etapa, passou-se a utilizá-lo na segunda etapa, para simular as características geométricas indicadas por Dufresne *et al.* (2010) em suas pesquisas experimentais, com *parâmetros de forma* entre 6,2 e 6,8.

Pode-se concluir que há uma forte correlação entre o *parâmetro de forma* e a conformação do campo de velocidades para as condições geométricas testadas. Estes resultados são concordantes com os de Kantoush e Schleiss (2014), embora discorde das pesquisas de Peltier *et al.* (2014b) que relatam a ocorrência de escoamentos assimétricos para parâmetros de forma acima de 6,2. Essa divergência pode ter sido causada por fatores hidráulicos ainda não considerados nestes estudos.

Dentre as simulações realizadas, cujos resultados são mostrados na Figura 5.2, para parâmetro de forma entre 6,2 e 6,8, todos os escoamentos foram do tipo simétrico, com exceção do parâmetro de forma 6,5. É interessante observar que este caso ocorreu por que a largura do canal de entrada da simulação difere 0,1m dos *parâmetros de forma* mais próximos, contudo,

produz uma conformação do campo de velocidades distinta das demais estudadas, que pode trazer condições mais desfavoráveis à deposição de sedimentos por ser assimétrica, segundo Kantoush (2008).

6.2 Influência da geometria na conformação no campo de velocidades de bacias rasas

Utilizando o mesmo procedimento referido no subitem anterior, quinze modelos com geometrias distintas foram criados para simular o escoamento na faixa de transição entre o simétrico e assimétrico, correspondente a *fatores de forma* entre 4,5 e 8,6, relatados na literatura técnica. Os modelos foram simulados pelo *software* Basement para as vazões de 0,8 L/s, 1,25 L/s e 3,5 L/s e rugosidades equivalentes ao coeficiente de Manning de 0,025 e 0,070. Para todas essas simulações foram calculadas alguns adimensionais referidos na bibliografia, quais sejam, o *fator de forma*, a *taxa de aspecto*, a *taxa de expansão* e o *índice de velocidade de vórtice*. Dentre esses, verificou-se que o *parâmetro de forma* e a *taxa de expansão* da bacia limitam com mais propriedade a possibilidade de formação de campos de velocidade simétricos ou assimétricos para escoamentos turbulentos. Para valores de *parâmetro de forma* acima de 6,2, escoamentos assimétricos ocorrem com maior frequência e o mesmo se passa para valores de *taxa de expansão* superiores a 10.

6.3 Influência de parâmetros hidráulicos na conformação no campo de velocidades de bacias rasas

Com base nos resultados das simulações numéricas relatadas no subitem 6.2 e na comparação entre as configurações dos campos de velocidades para vazões de 0,8L/s, 1,25 L/s e 3,5L/s e rugosidades equivalentes ao coeficiente de Manning de 0,025 e 0,070, a influência dos parâmetros hidráulicos foi avaliada por meio dos adimensionais: número de Froude do canal de entradas; número de Reynolds no canal de entrada e na bacia; índice de velocidade de vórtice e tempo de detenção.

Não foram gerados modelos com número de Froude na bacia que pudessem representar os vários tipos de escoamento (subcrítico, crítico e supercrítico). Todos os escoamentos experimentados foram subcríticos e com números de Froude entre 0,02 e 0,12. Deste modo uma avaliação da influência deste parâmetro na conformação do escoamento não pode ser feita de maneira ampla.

Um importante fato foi a observação da relevância do número de Reynolds na bacia para que ocorra uma variação da conformação da distribuição do campo de velocidades em função da geometria adotada. Em outras palavras: apenas se observa uma relevância dos parâmetros geométricos para a conformação do escoamento para escoamentos turbulentos na bacia ($Re > 1000$).

A rugosidade de $n=0,070$ demonstrou afetar de maneira semelhante o tipo de escoamento ocorrido com $n=0,025$ para a vazão de 3,5 L/s, em que o escoamento é turbulento. Para a rugosidade mais elevada ($n=0,070$) e para vazões mais baixas, onde se verifica regime laminar e de transição na bacia para vazões de 0,8L/s e 1,25L/s, respectivamente, o escoamento não se desenvolve plenamente, o que prejudicou a visualização.

6.4 Verificação experimental dos modelos numéricos para parâmetro de forma 7,2

Os cenários correspondentes ao *parâmetro de forma 7,2* foram simulados computacionalmente por meio do *software* Basement e em aparato experimental montado no Centro de Pesquisas Hidráulicas da UFMG, para as vazões de 0,5 L/s, 1,25 L/s e 3,4 L/s.

O aparato experimental possui 3,0 m de comprimento, 2,0 m de largura, canal de entrada com 0,125m de largura e rugosidade de 0,012. Para as três vazões avaliadas nos ensaios mediu-se a velocidade superficial, suposta como bidimensional utilizando o processo do LSPIV.

Verificou-se que qualitativamente o modelo numérico gerado para as condições geométricas e hidráulicas anteriormente descritas apresentou uma configuração de escoamento (simétrico ou assimétrico) semelhante ao do modelo experimental, principalmente para escoamento turbulento.

6.5 Estabelecer critérios de projeto em função dos parâmetros geométricos e hidráulicos avaliados

De posse das informações obtidas ao longo deste trabalho foi possível estabelecer condições geométricas e hidráulicas nas quais o escoamento deve ser assimétrico. Assim, para projetos de bacias onde se queira a minimização de depósito de sedimentos, por meio do estabelecimento de escoamento assimétrico, as seguintes condições são necessárias:

- Escoamento turbulento na bacia, ou seja $Re > 1000$;

- Parâmetro de forma igual, ou superior a 6,2;
- Taxa de expansão (B/b) igual, ou superior a 10.

É importante ressaltar que não é possível determinar o tipo de escoamento a ser formado exclusivamente em função dos parâmetros geométricos. De fato, no item 5.3 verificou-se que apenas para escoamentos turbulentos se pode definir com clareza a formação de escoamentos simétricos e assimétricos em função do seu parâmetro de forma.

7 RECOMENDAÇÕES

Recomenda-se as seguintes ações para aprofundamento do estudo aqui citado:

- Aprofundamento do estudo para incluir escoamentos laminares. Neste estudo, escoamentos laminares (encontrados em tanques de aquicultura) não puderam ser estudados de modo a identificar parâmetros hidráulicos e geométricos que definam a conformação do campo de velocidades;
- Ensaios em laboratório num aparato com geometria variável: apenas uma configuração geométrica pôde ser testada no presente estudo. Uma verificação de uma gama mais ampla de configurações geométricas seria de grande importância para o estudo de bacias rasas. Ainda dentro deste contexto, seria útil a observação de outras vazões que permitissem o escoamento turbulento na bacia;
- Verificar o funcionamento da bacia rasa em função do hidrograma de entrada e verificando a condição de saída, como em bacias de detenção de cheias;
- Confirmar a maior eficiência de retenção de sedimentos para as configurações simétricas utilizando um sedimento sintético;

REFERÊNCIAS

ALLERY, C.; GUERIN, S.; HAMDOUNI, A.; SAKOUT, A. Experimental and numerical POD study of the Coanda effect used to reduce self-sustained tones, *Mechanics Research Communications*, n. 31, p. 105-120, 2004.

BAPTISTA, M.B.; COELHO, M.M.L.P. Fundamentos de engenharia hidráulica. Editora UFMG. 2ª Ed., 2003.

BUCKINGHAM, E. The principle of similitude, *Nature*, v. 96, n. 2406, p. 396-397, 1915.

CAMNASIO, E.; ORSI, E.; SCHLEISS, A. Experimental study of velocity fields in rectangular shallow reservoirs. *Journal of Hydraulic Research*, n. 49, p. 352-358, 2011.

CAMNASIO, E. *Investigation of flow patterns and sedimentation in rectangular shallow reservoirs*. 2012. Tese (Doutorado em Engenharia) – Instituto Politécnico de Milão. Milão 2012.

CAMNASIO, E.; ERPICUM, S.; ORSI, E.; PIROTON, M.; SCHLEISS, A.; DEWALS, B. Coupling between flow and sediment deposition in rectangular shallow reservoirs. *Journal of Hydraulic Research*, v. 51, n. 5, p. 535-547, 2013.

CESARE, G.; SCHLEISS, A.; HERMANN, F. Impact of turbidity currents on reservoir sedimentation. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 127, n. 1, p. 6-16, 2001.

CHIANG, T. P.; SHEU, Tony W. H.; WANG, S. K. Side wall effects on the structure of laminar flow over a plane-symmetric sudden expansion. *Computers & fluids*, v. 29, n. 5, p. 467-492, 2000.

CHU, V. H.; LIU, F.; ALTAI, W. Friction and confinement effects on a Shallow recirculating flow. *Journal of Environmental Engineering and Science*, Vol. 3, p. 463-475, 2004.

DEWALS, B.J.; KANTOUSH, S.A.; ERPICUM, S.; PIROTON, M.; SCHLEISS, A.J. Experimental and numerical analysis of flow instabilities in rectangular shallow basins. *Environmental Fluid Mechanics* Vol. 8, p. 31-54, 2008.

DUFRESNE, M.; DEWALS, B.J.; ERPICUM, S.; ARCHAMBEAU, P.; PIROTTON, M. Classification of flow patterns in rectangular shallow reservoirs. *Journal of Hydraulic Research* n. 48 p. 197-204, 2010.

DUFRESNE, M.; DEWALS, B.; ERPICUM, S.; ARCHAMBEAU, P.; PIROTTON, M. Numerical Investigation of Flow Patterns in Rectangular Shallow Reservoirs. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, Vol. 5, No. 2, pp. 247-258. 2011.

DUFRESNE, M. *La modelisation 3d du transport solide dans les bassins en assainissement : du pilote experimental a l'ouvrage reel*. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Louis Pasteur. Estrasburgo 2008.

DURST, F.; MELLING, A.; WHITELAW, J. H. Low Reynolds number flow over a plane symmetric sudden expansion. *Journal of Fluid Mechanics* N. 64, p. 111-128, 1974.

ETH ZURICH. *System Manuals of BASEMENT*. Zurique, 2015. 602 p.

GRIBBIN, J. E. *Introdução à hidráulica, hidrologia e gestão de águas pluviais*. São Paulo: Cengage Learning, 2012.

JANSONS, K.; LAW, S. The hydraulic efficiency of simple stormwater ponds. *Rainwater and Urban Design* 2007. 2007.

JIRKA, G. H.; UIJTTEWAAL, W. S. J. Shallow flows: a definition. *Shallow flows*, p. 3-11, 2004.

KANTOUSH, S. A.; BOILLAT, J. L.; BOLLAERT, E.; SCHLEISS, A. J. Influence of shallow reservoir geometry on the flow pattern and sedimentation process by suspended sediments. *Symposium Mesures d'aménagements des cours d'eau pour la protection contre les crues, l'environnement, la société et l'économie*. 2007.

KANTOUSH, S.A. *Experimental study on the influence of the geometry of shallow reservoirs on flow patterns and sedimentation by suspended sediments*. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia) – EPFL. Lausanne 2008.

KANTOUSH, S. A.; SCHLEISS, A. J. Influence of geometry shape factor on trapping and flushing efficiencies. *In: Proceedings of River Flow 2014, Special Session on Reservoir Sedimentation*. CRC Press/Balkema, 2014. p. 129-137.

- LÓPEZ, P. R.; LAVÍN, A. G.; LOPÉZ, M. M. M.; HERAS, J. L. B. Flow models for rectangular sedimentation tanks. *Chemical Engineering and Processing*, Vol 47, pp. 1705–1716, 2007.
- MIZUSHIMA, J.; SHIOTANI, Y. Transitions and instabilities of flow in a symmetric channel with a suddenly expanded and contracted part. *Journal of Fluid Mechanics*, v. 434, p. 355–369, 2001.
- NOVAK, G.; STEINMAN, F.; MÜLLER, M.; BAJCAR, T. Study of velocity field at model sideweir using visualization method. *Journal of Hydraulic Research*, n. 50, p. 129-133, 2012.
- OCA, J.; MASALÓ, I.; REIG, L. Comparative analysis of flow patterns in aquaculture rectangular tanks with different water inlet characteristics. *Aquacultural Engineering* Vol. 31, pp. 221–236, 2004.
- PELTIER, Y.; ERPICUM, S.; ARCHAMBEAU, P.; PIROTON, M.; DEWALS, B. Can Meandering Flows in Shallow Rectangular Reservoirs Be Modeled with the 2D Shallow Water Equations?. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 141, n. 6, 2015.
- PELTIER, Y.; ERPICUM, S.; ACHAMBEAU, P; PIROTON, M. DEWALS, B. Experimental investigation of meandering jets in shallow reservoirs. *Environmental Fluid Mechanics*, v. 14, n. 3, p. 699-710, 2014.
- PELTIER, Y.; ERPICUM, S.; ARCHAMBEAU, P.; PIROTON, M.; DEWALS, B. Meandering jets in shallow rectangular reservoirs: POD analysis and identification of coherent structures. *Experiments in fluids*, v. 55, n. 6, p. 1740, 2014.
- PORTO, R. M. *Hidráulica Básica*. 4ª edição. São Carlos: EESC-USP, 2006.
- SHAPIRA, M.; DEGANI, D.; WEIHS, D. Stability and existence of multiple solutions for viscous flow in suddenly enlarged channels. *Computers & Fluids*, v. 18, n. 3, p. 239-258, 1990.
- SOBEY, IAN J.; DRAZIN, PHILIP G. Bifurcations of two-dimensional channel flows. *Journal of Fluid Mechanics*, v. 171, p. 263-287, 1986.
- VIANNA, M. R. *Mecânica dos fluidos para engenheiros*. Imprimatur, 2001.

WILLE, R.; FERNHOLZ, H. Report on the first European Mechanics Colloquium, on the Coanda effect. *Journal of Fluid Mechanics*, v. 23, n. 04, p. 801-819, 1965.

APÊNDICE I – CÓDIGO DA MACRO PARA GERAÇÃO DA NUVEM DE PONTOS DA BASE DAS BACIAS RASAS

Sub GeraXYZ()

```
'-----|
'| MACRO PARA GERAÇÃO DE COORDENADAS XYZ PARA BACIAS RASAS
RETANGULARES v.1.4 |
'| AUTOR: SIMÃO VOLOCH NETO |
'| BELO HORIZONTE / MG |
'| 18/06/2017 |
'-----|

'##Declaração de Variáveis
Dim i As Integer 'Contador de valores de 'x'
Dim j As Integer 'Contador de valores de 'y'
Dim k As Integer 'Contador não usado
Dim nX1 As Integer 'Número de seções 'x' no canal de entrada
Dim nX2 As Integer 'Número de seções 'x' na bacia rasa
Dim nX3 As Integer 'Número de seções 'x' no canal de saída
Dim nY1 As Integer 'Número de seções 'y' tanto no canal de entrada como no de saída
Dim nY2 As Integer 'Número de seções 'y' na bacia rasa
Dim incX As Double 'Incremento das seções no sentido 'x'
Dim incY As Double 'Incremento das seções no sentido 'y'
Dim maxZ As Double 'Valor máximo da altura 'z' da parede
Dim minZ As Double 'Valor mínimo da altura 'z' da parede
Dim L As Double 'Comprimento do corpo da bacia rasa
Dim B As Double 'Largura total da bacia rasa
Dim deltaB As Double 'metade do complemento da largura da bacia
Dim bmin As Double 'Largura do canal de entrada e de saída
Dim Lentrada As Double 'Comprimento do canal de entrada
Dim Lsaida As Double 'Comprimento do canal de saída
Dim li As Integer 'número da linha a ser escrita
Dim dentrada As Double 'Deslocamento de entrada
Dim dsaida As Double 'Deslocamento de saída

'##Leitura e cálculo das constantes
L = Cells(2, 2).Value 'Lê o valor do comprimento da bacia
B = Cells(5, 2).Value 'Lê o valor da largura da bacia
incX = Cells(4, 6).Value 'Lê o valor do incremento no sentido 'x'
incY = Cells(5, 6).Value 'Lê o valor do incremento no sentido 'y'
minZ = Cells(7, 6).Value 'Lê a altura mínima 'z'
maxZ = Cells(6, 6).Value 'Lê a altura máxima 'z'
deltaB = Cells(3, 2).Value 'Lê o valor de deltab
bmin = Cells(4, 2).Value 'Lê o valor da largura do canal de entrada
Lentrada = Cells(1, 6).Value 'Lê o comprimento do canal de entrada
Lsaida = Cells(2, 6).Value 'Lê o comprimento do canal de saída
dentrada = Cells(9, 6).Value 'Lê o deslocamento do canal de entrada
dsaida = Cells(10, 6).Value 'Lê o deslocamento do canal de saída
nX1 = Lentrada / incX 'Calcula o número de seções no sentido 'x' no canal de entrada
```

$nX2 = nX1 + (L / incX)$ 'Calcula o número de seções no sentido 'x' na bacia
 $nX3 = nX2 + (L_{saida} / incX)$ 'Calcula o número de seções no sentido 'x' no canal de saída
 $nY1 = Round(bmin / incY) + 2$ 'Calcula o número de seções no sentido 'y' dos canais de entrada e saída
 $nY2 = Round(B / incY)$ 'Calcula o número de seções no sentido 'y' na bacia

Application.StatusBar = "Iniciando... Pressione 'ESC' para interromper."

'Primeira Parte: entrada do Canal

For i = 0 To nX1 - 1

For j = 0 To nY1

li = 9 + j + i * (nY1 + 1)

Cells(li, 1).Value = i * incX

Cells(li, 2).Value = (j * incY) + deltaB - incY + dentrada

If (j * incY) + deltaB - incY < deltaB Or (j * incY) + deltaB - incY > deltaB + bmin Then

Cells(li, 3).Value = maxZ

Else

Cells(li, 3).Value = minZ

End If

Next j

Application.StatusBar = i & " de " & nX3 & " Seções concluídas. Pressione 'ESC' para interromper."

Next i

'Segunda Parte: meio do canal

For i = nX1 To nX2 - 1

For j = 0 To nY2

li = j + (i - nX1) * (nY2 + 1) + (9 + nY1 + (nX1 - 1) * (nY1 + 1)) + 1

Cells(li, 1).Value = i * incX

Cells(li, 2).Value = j * incY

If j * incY = 0 Or j * incY = B Then

Cells(li, 3).Value = maxZ

Else

Cells(li, 3).Value = minZ

End If

Next j

Application.StatusBar = i & " de " & nX3 & " Seções concluídas. Pressione 'ESC' para interromper."

Next i

'Terceira Parte: fim do Canal

For i = nX2 To nX3

For j = 0 To nY1

li = j + ((i - nX2) * (nY1 + 1)) + (nY2 + ((nX2 - 1) - nX1) * (nY2 + 1) + (9 + nY1 + (nX1 - 1) * (nY1 + 1)) + 1

Cells(li, 1).Value = i * incX

Cells(li, 2).Value = (j * incY) + deltaB - incY + dsaida

If (j * incY) + deltaB - incY < deltaB Or (j * incY) + deltaB - incY > deltaB + bmin Then

Cells(li, 3).Value = maxZ

Else

```
        Cells(li, 3).Value = minZ
    End If
Next j
Application.StatusBar = i & " de " & nX3 & " Seções concluídas.      Pressione 'ESC' para
interromper."
Next i
Application.StatusBar = "Todas as seções foram concluídas."
End Sub
```

APÊNDICE II – PARÂMETROS RESULTANTES DAS SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

Características geométricas

Largura do canal de entrada - b = 0,125					
Parâmetro de forma	6,6	6,7	7,2	8,0	8,6
L (m)	3	3	3	3	3
ΔB (m)	1,09	1,04	0,94	0,79	0,69
b (m)	0,125	0,125	0,125	0,125	0,125
B (m)	2,3	2,2	2	1,7	1,5
L/B	1,3	1,4	1,5	1,8	2,0
B/b	18	18	16	14	12
Nome da Geometria	A1	A2	A3	A4	A5

Largura do canal de entrada - b = 0,2					
Parâmetro de forma	5,5	5,7	6,1	6,8	7,4
L (m)	3	3	3	3	3
ΔB (m)	1,05	1,00	0,90	0,75	0,65
b (m)	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
B (m)	2,3	2,2	2	1,7	1,5
L/B	1,3	1,4	1,5	1,8	2,0
B/b	12	11	10	9	8
Nome da Geometria	B1	B2	B3	B4	B5

Largura do canal de entrada - b = 0,4					
Parâmetro de forma	4,5	4,6	4,9	5,6	6,2
L (m)	3	3	3	3	3
ΔB (m)	0,95	0,90	0,80	0,65	0,55
b (m)	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
B (m)	2,3	2,2	2	1,7	1,5
L/B	1,3	1,4	1,5	1,8	2,0
B/b	6	6	5	4	4
Nome da Geometria	C1	C2	C3	C4	C5

Altura de escoamento

		Altura - H (m)				
n = 0,025	Q = 0,8 L/s	0,066	0,07	0,076	0,085	0,097
	Q = 1,25 L/s	0,1	0,108	0,115	0,128	0,144
	Q = 3,5 L/s	0,258	0,24	0,296	0,385	0,351
n = 0,070	Q = 0,8 L/s	0,069	0,073	0,08	0,092	0,106
	Q = 1,25 L/s	0,107	0,114	0,124	0,141	0,162
	Q = 3,5 L/s	0,289	0,306	0,334	0,374	0,267
Nome da Geometria		A1	A2	A3	A4	A5

		Altura - H (m)				
n = 0,025	Q = 0,8 L/s	0,06	0,064	0,068	0,075	0,095
	Q = 1,25 L/s	0,09	0,095	0,099	0,111	0,113
	Q = 3,5 L/s	0,22	0,225	0,231	0,247	0,278
n = 0,070	Q = 0,8 L/s	0,065	0,069	0,075	0,085	0,096
	Q = 1,25 L/s	0,1	0,108	0,118	0,129	0,147
	Q = 3,5 L/s	0,267	0,282	0,303	0,333	0,371
Nome da Geometria		B1	B2	B3	B4	B5

		Altura - H (m)				
n = 0,025	Q = 0,8 L/s	0,053	0,055	0,057	0,061	0,066
	Q = 1,25 L/s	0,076	0,079	0,082	0,087	0,093
	Q = 3,5 L/s	0,172	0,176	0,18	0,187	0,192
n = 0,070	Q = 0,8 L/s	0,061	0,063	0,068	0,075	0,083
	Q = 1,25 L/s	0,09	0,094	0,102	0,111	0,123
	Q = 3,5 L/s	0,232	0,24	0,252	0,271	0,301
Nome da Geometria		C1	C2	C3	C4	C5

Número de Froude

Número de Froude - Fr						
n = 0,025	Q = 0,8 L/s	0,12	0,11	0,10	0,08	0,07
	Q = 1,25 L/s	0,10	0,09	0,08	0,07	0,06
	Q = 3,5 L/s	0,07	0,08	0,06	0,04	0,04
n = 0,070	Q = 0,8 L/s	0,11	0,10	0,09	0,07	0,06
	Q = 1,25 L/s	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05
	Q = 3,5 L/s	0,06	0,05	0,05	0,04	0,06
Nome da Geometria		A1	A2	A3	A4	A5

Número de Froude - Fr						
n = 0,025	Q = 0,8 L/s	0,09	0,08	0,07	0,06	0,04
	Q = 1,25 L/s	0,07	0,07	0,06	0,05	0,05
	Q = 3,5 L/s	0,05	0,05	0,05	0,05	0,04
n = 0,070	Q = 0,8 L/s	0,08	0,07	0,06	0,05	0,04
	Q = 1,25 L/s	0,06	0,06	0,05	0,04	0,04
	Q = 3,5 L/s	0,04	0,04	0,03	0,03	0,02
Nome da Geometria		B1	B2	B3	B4	B5

Número de Froude - Fr						
n = 0,025	Q = 0,8 L/s	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04
	Q = 1,25 L/s	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04
	Q = 3,5 L/s	0,04	0,04	0,04	0,03	0,03
n = 0,070	Q = 0,8 L/s	0,04	0,04	0,04	0,03	0,03
	Q = 1,25 L/s	0,04	0,03	0,03	0,03	0,02
	Q = 3,5 L/s	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02
Nome da Geometria		C1	C2	C3	C4	C5

Número de Reynolds na bacia

Número de Reynolds na bacia						
n = 0,025	Q = 0,8 L/s	329	342	372	428	472
	Q = 1,25 L/s	500	517	561	639	699
	Q = 3,5 L/s	1243	1306	1350	1417	1589
n = 0,070	Q = 0,8 L/s	328	341	370	425	467
	Q = 1,25 L/s	497	515	556	631	685
	Q = 3,5 L/s	1216	1245	1312	1430	1721
Nome da Geometria		A1	A2	A3	A4	A5

Número de Reynolds na bacia						
n = 0,025	Q = 0,8 L/s	331	344	375	432	473
	Q = 1,25 L/s	504	523	569	650	724
	Q = 3,5 L/s	1277	1321	1422	1595	1702
n = 0,070	Q = 0,8 L/s	329	342	372	428	473
	Q = 1,25 L/s	500	517	559	638	697
	Q = 3,5 L/s	1235	1266	1343	1479	1561
Nome da Geometria		B1	B2	B3	B4	B5

Número de Reynolds na bacia						
n = 0,025	Q = 0,8 L/s	333	346	378	439	490
	Q = 1,25 L/s	510	530	578	667	741
	Q = 3,5 L/s	1324	1371	1483	1688	1858
n = 0,070	Q = 0,8 L/s	330	344	375	432	480
	Q = 1,25 L/s	504	523	567	650	716
	Q = 3,5 L/s	1266	1306	1398	1561	1665
Nome da Geometria		C1	C2	C3	C4	C5

Número de Reynolds no canal de entrada

Número de Reynolds no canal de entrada						
n = 0,025	Q = 0,8 L/s	3113	3019	2888	2712	2508
	Q = 1,25 L/s	3846	3666	3521	3281	3027
	Q = 3,5 L/s	5460	5785	4881	3911	4232
n = 0,070	Q = 0,8 L/s	3042	2952	2807	2589	2374
	Q = 1,25 L/s	3687	3541	3351	3071	2784
	Q = 3,5 L/s	4979	4749	4414	4009	5311
Nome da Geometria		A1	A2	A3	A4	A5

Número de Reynolds no canal de entrada						
n = 0,025	Q = 0,8 L/s	2500	2439	2381	2286	2051
	Q = 1,25 L/s	3289	3205	3141	2962	2934
	Q = 3,5 L/s	5469	5385	5287	5043	4630
n = 0,070	Q = 0,8 L/s	2424	2367	2286	2162	2041
	Q = 1,25 L/s	3125	3005	2867	2729	2530
	Q = 3,5 L/s	4768	4581	4342	4042	3715
Nome da Geometria		B1	B2	B3	B4	B5

Número de Reynolds no canal de entrada						
n = 0,025	Q = 0,8 L/s	1581	1569	1556	1533	1504
	Q = 1,25 L/s	2264	2240	2216	2178	2133
	Q = 3,5 L/s	4704	4654	4605	4522	4464
n = 0,070	Q = 0,8 L/s	1533	1521	1493	1455	1413
	Q = 1,25 L/s	2155	2126	2070	2010	1935
	Q = 3,5 L/s	4051	3977	3872	3715	3493
Nome da Geometria		C1	C2	C3	C4	C5

Tipos de Escoamento

		Tipo de Escoamento				
n = 0,025	Q = 0,8 L/s	A1	A1	A1	A1	A1
	Q = 1,25 L/s	A1	A1	A1	A1	A1
	Q = 3,5 L/s	A1	A1	A1	A1	A1
n = 0,070	Q = 0,8 L/s	CH-L	CH-L	CH-L	S0/A1	S0/A1
	Q = 1,25 L/s	S0/A1	S0/A1	A2	A2	A2
	Q = 3,5 L/s	A1	A1	A1	A2	A2
Nome da Geometria		A1	A2	A3	A4	A5

		Tipo de Escoamento				
n = 0,025	Q = 0,8 L/s	S0/A1	A1	S0	S0/A1	S0
	Q = 1,25 L/s	S0/A1	A1	S0/A1	A1	S0/A1
	Q = 3,5 L/s	A1	A1	S0	A1	A1
n = 0,070	Q = 0,8 L/s	CH-L	CH-L	CH-L	CH-L	CH-L
	Q = 1,25 L/s	S0	S0	S0	S0	S0
	Q = 3,5 L/s	A2	A1	A1	A2	A1
Nome da Geometria		B1	B2	B3	B4	B5

		Tipo de Escoamento				
n = 0,025	Q = 0,8 L/s	S0/A1	S0/A1	S0/A1	S0/A1	A1
	Q = 1,25 L/s	S0	S0/A1	S0/A1	A1	A1
	Q = 3,5 L/s	S0/A1	S0/A1	A1	A1	A1
n = 0,070	Q = 0,8 L/s	CH-L	CH-L	CH-L	CH-L	CH-L
	Q = 1,25 L/s	S0	S0	S0	S0	S0
	Q = 3,5 L/s	S0	S0	S0/A1	S0/A1	S0/A1
Nome da Geometria		C1	C2	C3	C4	C5

Velocidade do vórtice (m/s)

		Velocidade do Vórtice (m/s)				
n = 0,025	Q = 0,8 L/s	0,04	0,03	0,03	0,03	0,02
	Q = 1,25 L/s	0,04	0,07	0,05	0,04	0,03
	Q = 3,5 L/s	0,07	0,06	0,05	0,06	0,08
n = 0,070	Q = 0,8 L/s	0,01	0,01	0,02	0,03	0,03
	Q = 1,25 L/s	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
	Q = 3,5 L/s	0,08	0,07	0,05	0,04	0,04
	Nome da Geometria	A1	A2	A3	A4	A5

		Velocidade do Vórtice (m/s)				
n = 0,025	Q = 0,8 L/s	0,04	0,04	0,05	0,03	0,02
	Q = 1,25 L/s	0,08	0,06	0,07	0,05	0,04
	Q = 3,5 L/s	0,07	0,07	0,09	0,03	0,05
n = 0,070	Q = 0,8 L/s	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
	Q = 1,25 L/s	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03
	Q = 3,5 L/s	0,11	0,11	0,14	0,08	0,13
	Nome da Geometria	B1	B2	B3	B4	B5

		Velocidade do Vórtice (m/s)				
n = 0,025	Q = 0,8 L/s	0,03	0,04	0,04	0,03	0,02
	Q = 1,25 L/s	0,05	0,05	0,05	0,03	0,03
	Q = 3,5 L/s	0,07	0,08	0,05	0,05	0,05
n = 0,070	Q = 0,8 L/s	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02
	Q = 1,25 L/s	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
	Q = 3,5 L/s	0,04	0,05	0,05	0,08	0,05
	Nome da Geometria	C1	C2	C3	C4	C5

Índice de velocidade do vórtice – IVV

Índice de Velocidade do Vórtice						
n = 0,025	Q = 0,8 L/s	7,12	5,29	5,23	4,97	4,00
	Q = 1,25 L/s	6,44	12,36	8,46	6,96	5,18
	Q = 3,5 L/s	11,70	9,28	9,13	11,22	11,28
n = 0,070	Q = 0,8 L/s	2,48	2,71	4,90	4,89	4,97
	Q = 1,25 L/s	8,07	8,03	7,74	7,67	7,97
	Q = 3,5 L/s	14,24	13,27	10,02	6,81	4,29
Nome da Geometria		A1	A2	A3	A4	A5

Índice de Velocidade do Vórtice						
n = 0,025	Q = 0,8 L/s	6,90	7,48	7,65	4,38	2,67
	Q = 1,25 L/s	13,25	10,03	11,09	7,55	5,42
	Q = 3,5 L/s	9,54	9,33	11,88	3,60	6,08
n = 0,070	Q = 0,8 L/s	2,52	2,66	2,63	2,53	2,61
	Q = 1,25 L/s	3,68	3,80	4,72	4,39	4,41
	Q = 3,5 L/s	19,74	18,61	24,67	12,13	20,75
Nome da Geometria		B1	B2	B3	B4	B5

Índice de Velocidade do Vórtice						
n = 0,025	Q = 0,8 L/s	3,81	5,29	5,34	3,24	2,85
	Q = 1,25 L/s	6,99	6,53	6,56	3,55	3,35
	Q = 3,5 L/s	7,80	8,30	5,25	4,09	3,70
n = 0,070	Q = 0,8 L/s	2,19	1,30	2,21	1,99	3,03
	Q = 1,25 L/s	2,48	2,48	2,45	3,02	2,21
	Q = 3,5 L/s	5,72	7,92	7,56	9,87	6,77
Nome da Geometria		C1	C2	C3	C4	C5

Tempo de detenção (s)

		Tempo de detenção (s)				
n = 0,025	Q = 0,8 L/s	569	578	570	542	546
	Q = 1,25 L/s	552	570	552	522	518
	Q = 3,5 L/s	509	453	507	561	451
n = 0,070	Q = 0,8 L/s	595	602	600	587	596
	Q = 1,25 L/s	591	602	595	575	583
	Q = 3,5 L/s	570	577	573	545	343
Nome da Geometria		A1	A2	A3	A4	A5

		Tempo de detenção (s)				
n = 0,025	Q = 0,8 L/s	518	528	510	478	534
	Q = 1,25 L/s	497	502	475	453	407
	Q = 3,5 L/s	434	424	396	360	357
n = 0,070	Q = 0,8 L/s	561	569	563	542	540
	Q = 1,25 L/s	552	570	566	526	529
	Q = 3,5 L/s	526	532	519	485	477
Nome da Geometria		B1	B2	B3	B4	B5

		Tempo de detenção (s)				
n = 0,025	Q = 0,8 L/s	457	454	428	389	371
	Q = 1,25 L/s	420	417	394	355	335
	Q = 3,5 L/s	339	332	309	272	247
n = 0,070	Q = 0,8 L/s	526	520	510	478	467
	Q = 1,25 L/s	497	496	490	453	443
	Q = 3,5 L/s	457	453	432	395	387
Nome da Geometria		C1	C2	C3	C4	C5