

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ**

**CLÁUDIA TREVISOL DALMORA**

**CONSTRUÇÃO DE ENSECADEIRAS EM ÁGUA CORRENTE  
ESTUDO DA ESTABILIDADE DE MATERIAL LANÇADO EM PONTA DE ATERRO**

**CURITIBA**

**2015**

CLÁUDIA TREVISOL DALMORA

**CONSTRUÇÃO DE ENSECADEIRAS EM ÁGUA CORRENTE  
ESTUDO DA ESTABILIDADE DE MATERIAL LANÇADO EM PONTA DE ATERRO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental (PPGERHA), Departamento de Hidráulica e Saneamento (DHS), Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. José Junji Ota

CURITIBA

2015

---

D148c

Dalmora, Cláudia Trevisol

Construção de ensecadeiras em água corrente estudo da estabilidade de material lançado em ponta de aterro / Cláudia Trevisol Dalmora. – Curitiba, 2016.

135f. : il. [algumas color.] ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, 2016.

Orientador: José Junji Ota

1. Engenharia Ambiental. 2. Engenharia Hidráulica - rios. I. Universidade Federal do Paraná. II. Ota, José Junji. III. Título.

CDD: 627.13

---

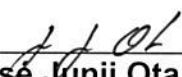
## TERMO DE APROVAÇÃO

### CLÁUDIA TREVISOL DALMORA

# “Construção de Ensecadeiras em Água Corrente – Estudo da Estabilidade de Material Lançado Em Ponta de Aterro”.

Dissertação aprovada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental do Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, pela comissão formada pelos professores:

PRESIDENTE:

  
\_\_\_\_\_  
**José Junji Ota**  
Universidade Federal do Paraná  
Orientador

MEMBROS:

  
\_\_\_\_\_  
**Júlio Gomes**  
Universidade Federal do Paraná

  
\_\_\_\_\_  
**Miriam Rita Moro Mine**  
Universidade Federal do Paraná

  
\_\_\_\_\_  
**Carlos Barreira Martinez**  
Universidade Federal de Minas Gerais

Curitiba, 10 de abril de 2015.

## AGRADECIMENTOS

À Deus, por providenciar a força, tirar o cansaço e clarear as ideias.

À minha família, pelo apoio incondicional em todas as minhas caminhadas. Em especial aos meus pais, Valmor e Nadia, porque me ensinaram o valor do conhecimento. Porque mesmo longe estiveram tão perto e tão presentes. Pelas palavras de incentivo e apoio em todos os momentos, especialmente àqueles de maior dificuldade, e principalmente por sempre acreditarem em mim. Obrigada pelos seus ensinamentos e palavras, vocês são valiosos. A minha irmã, Patricia, amiga que Deus providenciou, por me entender tão bem. A minha tia Iara pelo carinho e tempo dedicado a mim e a este trabalho. Ao meu noivo, Claudio, companheiro para todas as horas, obrigada pela paciência e por ser tão dedicado a nós.

À Intertechne pela oportunidade de trabalhar com Hidráulica, pela oportunidade e incentivo para realizar o Mestrado e este trabalho e por providenciar as ferramentas para que isto fosse possível.

Aos colegas, amigos e mestres do trabalho, por entenderem tão bem as minhas dificuldades ao longo desta caminhada e pelo apoio e auxílio em todos os passos. Aos amigos da vida, porque estiveram do meu lado mesmo na minha ausência, porque me escutaram nas dificuldades e me apoiaram incondicionalmente.

Aos professores membros da banca de qualificação, professora Miriam Rita Moro Mine e professor Julio Gomes, obrigada pelas sugestões que tanto contribuíram para este trabalho. Aos professores, membros da banca de defesa, professora Miriam Rita Moro Mine, professor Julio Gomes e professor Carlos Barreira Martinez, obrigada por aceitarem este convite.

Por fim, e de fundamental importância, ao meu professor orientador José Junji Ota, pela oportunidade de ser sua orientanda, não apenas durante os três anos de Mestrado, mas desde a graduação em Engenharia Civil. Não só pela sugestão do tema, mas por se preocupar que eu me identificasse com o tema. Por compreender e me auxiliar nas dificuldades encontradas ao longo da caminhada. Por ser não apenas meu orientador, mas também meu professor e meu mestre. Pelo tempo dedicado e pela pronta disposição. Por ler (e reler) meu trabalho. E principalmente, pela paciência. Registro aqui minha profunda gratidão e admiração.

## RESUMO

Em obras hidráulicas, o manejo do rio durante a construção é um fator importante com relação ao esquema geral da obra. A construção das ensecadeiras em água corrente com a função de controlar o rio e proporcionar área seca para que as obras permanentes possam ser construídas no leito, é frequentemente uma atividade complexa, envolvendo os principais problemas de construção.

Apesar do custo do fechamento corresponder, geralmente, a uma pequena porcentagem do custo total da obra, deve ser estudado com cuidado, pois uma falha pode causar um atraso sério e custoso no cronograma.

Os estudos disponíveis sobre as condições de estabilidade do enrocamento no fechamento de rios para a construção de obras hidráulicas são baseados em métodos aproximados, desenvolvidos por meio de considerações teóricas, observações experimentais de laboratório e de campo, e possibilitam que o projetista determine o diâmetro do material necessário para executar o fechamento do rio.

Como objetivo geral para esta pesquisa, pretendeu-se estudar o comportamento hidráulico do escoamento no fechamento de rio pelo método lateral progressivo ou ponta de aterro, método bastante usual no Brasil. Como objetivos específicos, pretendeu-se avaliar como a curvatura do escoamento na ponta de aterro afeta o escoamento nessa região. Este efeito foi avaliado a partir da alteração de dois parâmetros geométricos da ensecadeira com a utilização de um modelo numérico tridimensional. Os dois parâmetros geométricos estudados foram: 1) largura da crista; e 2) inclinação do talude. Para possibilitar as respostas às perguntas feitas por esta dissertação, definiu-se outro objetivo específico que consiste na avaliação da capacidade do modelo numérico escolhido para as simulações, o Flow 3D®, em reproduzir as características deste tipo de escoamento. Para atender a este objetivo, realizou-se uma primeira etapa de estudo chamada de Etapa 1 – Estudo de Caso na qual foram realizadas simulações em modelo numérico com o objetivo de reproduzir uma investigação experimental já realizada em modelo hidráulico reduzido. Após esta etapa de estudos e da análise comparativa dos resultados, concluiu-se que o modelo numérico escolhido é adequado para a resolução desse tipo de problema. Também são apresentados e avaliados os resultados para as três malhas de elementos utilizadas nas simulações em comparação aos resultados que se

pretendia atingir da investigação experimental. Concluída a primeira etapa, realizou-se a análise da variação dos dois parâmetros geométricos da ensecadeira (Etapa 2). São apresentados e analisados além dos valores de velocidade e tensão tangencial, sua localização e distribuição em cada caso estudado e as linhas de corrente que dão um indicativo da curvatura do escoamento em cada caso. Essas análises permitiram chegar às conclusões principais de que o aumento da largura da crista e conseqüentemente do raio da ponta de aterro, bem como, a diminuição da inclinação do talude da ensecadeira afetam a curvatura do escoamento na ponta de aterro e resultam na diminuição das velocidades e tensão tangencial nessa região.

Palavras-chave: fechamento do rio, ensecadeira, lançamento lateral progressivo, ponta de aterro.

## ABSTRACT

In hydraulic works, the management of the river during the construction is an important factor with respect to the general scheme of the work. The construction of cofferdams through running water to river control and to provide dry areas for the permanent works into the riverbed is often a complex activity, involving the main construction problems.

Despite the cost of the river closure correspond generally a small percentage of the total cost of the work, must be carefully studied because a failure can lead to a serious and costly schedule delay.

The available studies about the rock fill stability in the river closure for the construction of hydraulic works are based on approximated methods, developed through theoretical considerations, experimental observations at the laboratory and at the field, and enable the designer to determine the diameter of the material that is needed to guarantee the success of the river closure.

As a general goal for this study, is intended to study the hydraulic behavior of the flow in the river closure by the end dumping method, quite usual method in Brazil. As specific goals, the purpose was to evaluate how the curvature of the flow in the cofferdam affects the flow behavior in this region. This effect was evaluated changing two geometric parameters of the cofferdam using a three-dimensional numerical model. The two geometric parameters studied were 1) width of the crest; and 2) embankment slope. To answer the questions asked by this dissertation, it was defined another specific goal that is to evaluate the ability of the numerical model chosen for the simulations, the Flow 3D®, to reproduce the characteristics of this type of flow. To achieve this goal, there was a first study stage called Stage 1 – Case Study in which it were performed numerical simulations in order to reproduce an experimental research already done in reduced hydraulic model. After this stage of studies and after the comparative analysis of the results it was concluded that the chosen numerical model is appropriate to solve this type of problem. It also are presented and evaluated the results of the three mesh elements that were used in the simulations in comparison with the results that it was intended to achieve of the experimental research. After the first stage was completed, it was done the analysis of the variation of the two geometric parameters of the cofferdam, the stage called

Stage 2. It is presented and analyzed the values of velocity and shear stress, their location and distribution in each study case and the streamlines that indicates the flow curve in each case. These analysis allowed the mainly conclusions that increasing the width of the crest and therefore the radius of the cofferdam as well as the decreasing of the embankment slope affect the curvature of the flow and leads to the decreasing of the velocity and the shear stress in the cofferdam.

Keywords: river closure; cofferdam; end dumping.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 – ESQUEMA TÍPICO DE DESVIO DO RIO POR TÚNEIS .....	24
FIGURA 2.2 – ESQUEMA TÍPICO DE ALARGAMENTO DA CALHA ESTRANGULADA PARA DESVIO DO RIO POR CANAL NA OBRA DE BAIXO IGUAÇU NO RIO IGUAÇU, PARANÁ .....	24
FIGURA 2.3 – ESQUEMA TÍPICO DE DESVIO POR CANAL LATERAL .....	25
FIGURA 2.4 - DESVIO DO RIO ATRAVÉS DE ADUFAS DE DESVIO .....	26
FIGURA 2.5 - DESVIO DO RIO EM UM ÚNICO ESTÁGIO .....	27
FIGURA 2.6 – DESVIO DO RIO EM DOIS ESTÁGIOS .....	28
FIGURA 2.7 – DESVIO DO RIO EM MAIS DE DOIS ESTÁGIOS.....	29
FIGURA 2.8 – CONFIGURAÇÃO N <sup>o</sup> 3 DURANTE A FORMAÇÃO DE UMA ENSECADEIRA DE ENROCAMENTO EM LANÇAMENTO TRANSVERSAL UNIFORME.....	31
FIGURA 2.9 – CONFIGURAÇÃO N <sup>o</sup> 4 DURANTE A FORMAÇÃO DE UMA ENSECADEIRA DE ENROCAMENTO EM LANÇAMENTO TRANSVERSAL UNIFORME.....	32
FIGURA 2.10 – CONFIGURAÇÃO TÍPICA DO FECHAMENTO DE RIO PELO MÉTODO LATERAL PROGRESSIVO .....	32
FIGURA 2.11 – CONFIGURAÇÃO DO PRIMEIRO ESTÁGIO DE FECHAMENTO DE RIO PELO MÉTODO LATERAL PROGRESSIVO .....	33
FIGURA 2.12 – CONFIGURAÇÃO DO SEGUNDO ESTÁGIO DE FECHAMENTO DE RIO PELO MÉTODO LATERAL PROGRESSIVO .....	33
FIGURA 2.13 - FECHAMENTO DO CORDÃO DE ENROCAMENTO DO LEITO DO RIO MADEIRA PARA A CONSTRUÇÃO DA UHE SANTO ANTÔNIO (PORTO VELHO – RONDÔNIA) .....	34
FIGURA 2.14 – CONCLUSÃO DO FECHAMENTO DO CORDÃO DE ENROCAMENTO DO LEITO DO RIO MADEIRA PARA A CONSTRUÇÃO DA UHE SANTO ANTÔNIO (PORTO VELHO – RONDÔNIA) .....	35
FIGURA 2.15 – DIFERENTES POSIÇÕES DAS PEDRAS EM UMA ENSECADEIRA DE ENROCAMENTO.....	37

FIGURA 2.16 – VELOCIDADES CRÍTICAS PARA SEDIMENTO DE QUARTZO EM FUNÇÃO DO DIÂMETRO MÉDIO DO GRÃO .....	41
FIGURA 2.17 – DIAGRAMA DE SHIELDS.....	43
FIGURA 2.18 – DIAGRAMA DE SHIELDS COM CONDIÇÕES INCIPIENTES PARA LEITOS FIXOS LISOS E RUGOSOS .....	47
FIGURA 2.19 – AVANÇO EM PONTA DE ATERRO DA MARGEM ESQUERDA PARA A MARGEM DIREITA NO ESTUDO DO FECHAMENTO DO RIO PARANÁ NO EIXO 1 PARA CONSTRUÇÃO DA ITAIPU.....	49
FIGURA 2.20 – CONDIÇÕES DE ESCOAMENTO – LIMITE DE ESTABILIDADE DO MATERIAL IV NO ESTUDO DO FECHAMENTO DO RIO PARANÁ NO EIXO 1 .....	50
FIGURA 2.21 – CONFIGURAÇÃO RESULTANTE DA PRÉ-ENSECADEIRA Nº 1 NO ESTUDO DO FECHAMENTO DO RIO PARANÁ .....	50
FIGURA 2.22 – SEÇÃO TRANSVERSAL PRÉ-ENSECADEIRA Nº 1 E MATERIAIS PARA O FECHAMENTO DO RIO PARANÁ NO EIXO 1 .....	51
FIGURA 2.23 – AVANÇO EM PONTA DE ATERRO SIMULTÂNEAMENTE A PARTIR DAS DUAS MARGENS PARA O ESTUDO DO FECHAMENTO DO RIO PARANÁ NO EIXO 22 PARA A CONSTRUÇÃO DA ITAIPU .....	54
FIGURA 2.24 – LIMITE DE ESTABILIDADE DO MATERIAL IV NO ESTUDO DO FECHAMENTO DO RIO PARANÁ NO EIXO 22.....	56
FIGURA 2.25 – ESTUDO DO FECHAMENTO DO RIO PARANÁ COM TETRAEDROS NO EIXO 22.....	56
FIGURA 2.26 – ESTUDO DO FECHAMENTO DO RIO PARANÁ COM TETRAEDROS – SITUAÇÃO FINAL NO EIXO 22 .....	57
FIGURA 2.27 – ESTUDO DO FECHAMENTO DO RIO PARANÁ COM CUBOS – SITUAÇÃO FINAL NO EIXO 22.....	57
FIGURA 2.28 – CONFIGURAÇÃO RESULTANTE DO ESTUDO DO FECHAMENTO DO RIO PARANÁ NO EIXO 22 - CORTE .....	58
FIGURA 2.29 – RELAÇÃO VELOCIDADE DO ESCOAMENTO <i>VERSUS</i> PESO E DIÂMETRO DOS BLOCOS .....	61
FIGURA 2.30 – ÂNGULO DE REPOUSO DE MATERIAL NÃO COESIVO .....	62
FIGURA 2.31 – ÂNGULO DE INCLINAÇÃO DO TALUDE DE UMA ENSECADEIRA .....	63

FIGURA 3.1 – FLUXOGRAMA DA ETAPA 1 DE ESTUDOS .....	71
FIGURA 3.2 – FLUXOGRAMA DA ETAPA 2 DE ESTUDOS .....	72
FIGURA 3.3 – PLANTA E DIMENSÕES DA ENSECADEIRA - INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL (PEREIRA, 2001) .....	73
FIGURA 3.4 – CORTE “A” E DIMENSÕES DA ENSECADEIRA - INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL (PEREIRA, 2001) .....	74
FIGURA 3.5 – CORTE “B” E DIMENSÕES DA ENSECADEIRA - INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL (PEREIRA, 2001) .....	74
FIGURA 3.6 – ENSECADEIRA DA INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL (PEREIRA, 2001) – PONTOS DE REGISTRO DE VELOCIDADE NO ENTORNO DA PONTA DE ATERRO – PLANTA .....	75
FIGURA 3.7 – ENSECADEIRA INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL (PEREIRA, 2001) – PONTOS DE REGISTRO DE VELOCIDADE NO ENTORNO DA PONTA DE ATERRO - CORTE .....	75
FIGURA 3.8 – PONTOS DE REGISTRO DE VELOCIDADE NA SIMULAÇÃO NUMÉRICA.....	76
FIGURA 3.9 – INDICAÇÃO ESQUEMÁTICA DOS PONTOS DE REGISTRO DE VELOCIDADE NA SIMULAÇÃO NUMÉRICA EM UMA SEÇÃO NO EIXO DA ENSECADEIRA (90°) .....	76
FIGURA 3.10 – PLANTA DO CANAL EM MODELO NUMÉRICO .....	79
FIGURA 3.11 – CANAL E ENSECADEIRA EM MODELO NUMÉRICO .....	80
FIGURA 3.12 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA DISCRETIZAÇÃO DA MALHA DE ELEMENTOS FINITOS DAS SIMULAÇÕES MODELO NUMÉRICO .....	82
FIGURA 3.13 – MALHA DE ELEMENTOS FINITOS DA SIMULAÇÃO INICIAL EM MODELO NUMÉRICO .....	82
FIGURA 3.14 – MALHA DE ELEMENTOS FINITOS DA SEGUNDA SIMULAÇÃO EM MODELO NUMÉRICO .....	83
FIGURA 3.15 – MALHA DE ELEMENTOS FINITOS DA SIMULAÇÃO FINAL EM MODELO NUMÉRICO .....	83
FIGURA 3.16 – COMPARAÇÃO DAS GEOMETRIAS DA ENSECADEIRA NAS TRÊS ETAPAS DE SIMULAÇÃO .....	84
FIGURA 3.17 – CONDIÇÃO INICIAL DA SIMULAÇÃO EM MODELO NUMÉRICO .....	85
FIGURA 3.18 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DOS “BAFFLES” .....	88

FIGURA 3.19 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DOS “PROBES” .....	88
FIGURA 3.20 – ESTUDO DA VARIAÇÃO DA LARGURA DA CRISTA .....	92
FIGURA 3.21 – PONTOS DE LEITURA DE VELOCIDADES (“PROBES”) CONSIDERANDO A VARIAÇÃO DA LARGURA DA CRISTA.....	93
FIGURA 3.22 – ENSECADEIRA ORIGINAL - CORTE TRANSVERSAL NA BRECHA .....	94
FIGURA 3.23 – ENSECADEIRA ORIGINAL (Talude 34°) e ENSECADEIRA TALUDE 25° - CORTE TRANSVERSAL NA BRECHA.....	95
FIGURA 3.24 – ENSECADEIRA INCLINAÇÃO DO TALUDE 25° - CORTE TRANSVERSAL NA BRECHA.....	95
FIGURA 3.25 – PONTOS DE LEITURA DE VELOCIDADES (“PROBES”) CONSIDERANDO A VARIAÇÃO DA INCLINAÇÃO DO TALUDE.....	95
FIGURA 4.1 – RELAÇÃO (v/U) VERSUS (h/H) – SEÇÃO “A” .....	98
FIGURA 4.2 – RELAÇÃO (v/U) VERSUS (h/H) – SEÇÃO “B” .....	99
FIGURA 4.3 – RELAÇÃO (v/U) VERSUS (h/H) – SEÇÃO “C” .....	100
FIGURA 4.4 – EVOLUÇÃO DOS RESULTADOS AO LONGO DAS SIMULAÇÕES – SEÇÃO “A”.....	103
FIGURA 4.5 – EVOLUÇÃO DOS RESULTADOS AO LONGO DAS SIMULAÇÕES – SEÇÃO “B”.....	104
FIGURA 4.6 – EVOLUÇÃO DOS RESULTADOS AO LONGO DAS SIMULAÇÕES – SEÇÃO “C” .....	105
FIGURA 4.7 – VARIAÇÃO DA LARGURA DA CRISTA DA ENSECADEIRA RELAÇÃO (v/U) VERSUS (h/H) – SEÇÃO “A” .....	108
FIGURA 4.8 – VARIAÇÃO DA LARGURA DA CRISTA DA ENSECADEIRA RELAÇÃO (v/U) VERSUS (h/H) – SEÇÃO “B” .....	109
FIGURA 4.9 – VARIAÇÃO DA LARGURA DA CRISTA DA ENSECADEIRA RELAÇÃO (v/U) VERSUS (h/H) – SEÇÃO “C” .....	110
FIGURA 4.10 – ENSECADEIRA R = 0,1 m – TENSÃO TANGENCIAL (N/m <sup>2</sup> ) .....	111
FIGURA 4.11 – ENSECADEIRA ORIGINAL (R = 0,15 m) – TENSÃO TANGENCIAL (N/m <sup>2</sup> ).....	111
FIGURA 4.12 – ENSECADEIRA R = 0,2 m – TENSÃO TANGENCIAL (N/m <sup>2</sup> ) .....	112
FIGURA 4.13 – ENSECADEIRA R = 0,4 m – TENSÃO TANGENCIAL (N/m <sup>2</sup> ) .....	112
FIGURA 4.14 - ENSECADEIRA R = 0,1 m – TENSÃO TANGENCIAL (N/m <sup>2</sup> ) .....	113

FIGURA 4.15 - ENSECADEIRA ORIGINAL (R = 0,15 m) – TENSÃO TANGENCIAL (N/m <sup>2</sup> ).....	113
FIGURA 4.16 - ENSECADEIRA R = 0,2 m – TENSÃO TANGENCIAL (N/m <sup>2</sup> ) .....	113
FIGURA 4.17 - ENSECADEIRA R = 0,4 m – TENSÃO TANGENCIAL (N/m <sup>2</sup> ) .....	113
FIGURA 4.18 – ENSECADEIRA R = 0,1 m – LINHAS DE CORRENTE E ESCALA GRÁFICA VELOCIDADE (m/s).....	114
FIGURA 4.19 – ENSECADEIRA ORIGINAL (R = 0,15 m) – LINHAS DE CORRENTE E ESCALA GRÁFICA VELOCIDADE (m/s) .....	114
FIGURA 4.20 – ENSECADEIRA R = 0,2 m – LINHAS DE CORRENTE E ESCALA GRÁFICA VELOCIDADE (m/s).....	114
FIGURA 4.21 – ENSECADEIRA R = 0,4 m – LINHAS DE CORRENTE E ESCALA GRÁFICA VELOCIDADE (m/s).....	114
FIGURA 4.22 – COMPARAÇÃO LINHA DE CORRENTE DAS ENSECADEIRAS SIMULADAS .....	115
FIGURA 4.23 – VARIAÇÃO DA INCLINAÇÃO DO TALUDE DA ENSECADEIRA RELAÇÃO (v/U) VERSUS (h/H) – SEÇÃO “A” .....	117
FIGURA 4.24 – VARIAÇÃO DA INCLINAÇÃO DO TALUDE DA ENSECADEIRA RELAÇÃO (v/U) VERSUS (h/H) – SEÇÃO “B” .....	118
FIGURA 4.25 – VARIAÇÃO DA INCLINAÇÃO DO TALUDE DA ENSECADEIRA RELAÇÃO (v/U) VERSUS (h/H) – SEÇÃO “C” .....	119
FIGURA 4.26 – ENSECADEIRA ORIGINAL (TALUDE 34°) – TENSÃO TANGENCIAL (N/m <sup>2</sup> ).....	120
FIGURA 4.27 – ENSECADEIRA TALUDE 25° – TENSÃO TANGENCIAL (N/m <sup>2</sup> ) ..	120
FIGURA 4.28 – ENSECADEIRA ORIGINAL (TALUDE 34°) – TENSÃO TANGENCIAL (N/m <sup>2</sup> ).....	120
FIGURA 4.29 – ENSECADEIRA TALUDE 25° – TENSÃO TANGENCIAL (N/m <sup>2</sup> ) ..	120
FIGURA 4.30 – ENSECADEIRA ORIGINAL (TALUDE 34°) – LINHAS DE CORRENTE E ESCALA GRÁFICA VELOCIDADE (m/s) .....	121
FIGURA 4.31 – ENSECADEIRA TALUDE 25° – LINHAS DE CORRENTE E ESCALA GRÁFICA VELOCIDADE (m/s).....	121
FIGURA 4.32 – COMPARAÇÃO DAS LINHAS DE CORRENTE DAS ENSECADEIRAS SIMULADAS .....	122

## LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 – PRÉ-ENSECADEIRA 1 – ESTUDO DO FECHAMENTO DO RIO PARANÁ NO EIXO 1 - MARGEM ESQUERDA PARA MARGEM DIREITA.....	52
TABELA 2.2 – PRÉ-ENSECADEIRA 22 – ESTUDO DO FECHAMENTO DO RIO PARANÁ - AVANÇO SIMULTANEAMENTE A PARTIR DAS DUAS MARGENS.....	59
TABELA 2.3 – RELAÇÃO TEÓRICA ENTRE O ÂNGULO DE REPOUSO/INCLINAÇÃO DO TALUDE E VELOCIDADE NA REGIÃO DA PONTA DE ATERRO DA ENSECADEIRA .....	63
TABELA 3.1 – AFASTAMENTO DOS PONTOS DE REGISTRO DE VELOCIDADE COM RELAÇÃO AO TALUDE DA ENSECADEIRA.....	75
TABELA 3.2 – VELOCIDADES REGISTRADAS NA SEÇÃO “A” NO MODELO FÍSICO NA INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL DE PEREIRA (2001).	77
TABELA 3.3 – VELOCIDADES REGISTRADAS NA SEÇÃO “B” NO MODELO FÍSICO NA INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL DE PEREIRA (2001).	77
TABELA 3.4 – VELOCIDADES REGISTRADAS NA SEÇÃO “C” NO MODELO FÍSICO NA INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL DE PEREIRA (2001).	77
TABELA 3.5 – TEMPOS DAS SIMULAÇÕES NUMÉRICAS .....	89

## LISTA DE SÍMBOLOS

$V_m; V_M; V_c$	-	velocidade crítica de arrastamento;
$Y'_d; Y_d$	-	coeficientes obtidos experimentalmente;
$g$	-	aceleração da gravidade;
$\gamma_s$	-	peso específico do material;
$\gamma$	-	peso específico da água;
$d$	-	diâmetro nominal do material - diâmetro da esfera de mesmo volume;
$f'$	-	coeficiente numérico;
$\alpha$	-	ângulo entre o plano da superfície de fundo com a horizontal;
$v$	-	velocidade média do escoamento;
$\Delta h$	-	desnível na seção estrangulada pela ensecadeira;
$\alpha_o$	-	ângulo de repouso do material em água parada;
$u$	-	velocidade a uma distância $y$ acima do fundo;
$U_*$	-	velocidade de corte;
$a_r$	-	função do número de Reynolds de corte obtida experimentalmente;
$Re$	-	número de Reynolds;
$Re^*$	-	número de Reynolds de corte;
$k_s$	-	dimensão característica da rugosidade do enrocamento;
$\nu$	-	viscosidade cinemática do fluido;
$\rho$	-	densidade do fluído;
$\mu$	-	viscosidade dinâmica do fluido;
$y$	-	profundidade em relação ao fundo do leito;
$\xi$	-	coeficiente experimental;
$\tau$	-	esforço tangencial;
$\tau_0$	-	esforço tangencial junto ao leito;
$\tau_{0c}$	-	esforço tangencial crítico junto ao leito;
$\tau_c$	-	esforço tangencial crítico;
$S$	-	declividade;

$S_s$	-	densidade relativa do material do enrocamento;
$\Psi$	-	tensão tangencial adimensional;
$\psi_c$	-	tensão tangencial crítica;
$\psi_{oc}$	-	tensão tangencial adimensional crítica;
$\psi_k$	-	tensão tangencial adimensional crítica incipiente de areia;
$\Phi$	-	ângulo de repouso do material;
$R$	-	raio hidráulico;
$Q$	-	vazão de água.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>19</b>
1.1 OBJETIVOS .....	20
1.1.1 Objetivo Geral .....	20
1.1.2 Objetivos Específicos.....	21
<b>2 REVISÃO DA LITERATURA .....</b>	<b>22</b>
2.1 DESVIO DO RIO.....	22
2.1.1 Estruturas para o Desvio do Rio .....	23
2.1.2 Estágios para o Desvio do Rio.....	26
2.1.2.1 Desvio do rio em um único estágio.....	26
2.1.2.2 Desvio do rio em mais de um estágio.....	27
2.2 CONSTRUÇÃO DE ENSECADURA EM ÁGUA CORRENTE – FECHAMENTO DE RIOS .....	30
2.2.1 Lançamento Transversal Uniforme .....	30
2.2.2 Lançamento Lateral Progressivo .....	32
2.3 EQUAÇÕES FUNDAMENTADAS EM ESTUDOS TEÓRICO-EXPERIMENTAIS .....	35
2.3.1 Equações fundamentadas na Velocidade Crítica .....	35
2.3.1.1 Método de Isbash .....	36
2.3.1.2 Método de Blanchet.....	38
2.3.1.3 Método de Bouvard .....	39
2.3.2 Equações fundamentadas no Esforço Tangencial Crítico .....	40
2.3.2.1 Estudos de Pedrolli.....	44
2.3.2.2 Estudos de Novak e Nalluri .....	45
2.4 ESTUDOS EM MODELO HIDRÁULICO REDUZIDO .....	47
2.4.1 Fechamento do Rio Paraná – Usina Hidroelétrica de Itaipu .....	48
2.5 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS EM MODELOS REDUZIDOS E EM PROTÓTIPOS.....	60
2.6 ÂNGULO DE REPOUSO DOS MATERIAIS .....	62
2.7 DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL .....	64
2.7.1 Equações Governantes dos Fluidos .....	65
2.7.1.1 Decomposição de Reynolds .....	67

2.7.1.2 Modelos de Turbulência .....	68
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>70</b>
3.1 ESTUDO DE CASO .....	72
3.1.1 Investigação Experimental .....	73
3.1.2 Modelagem Numérica.....	78
3.1.2.1 Definição da Geometria.....	78
3.1.2.2 Definição da Malha de Elementos .....	80
3.1.2.3 Definição das condições de contorno e condição inicial de simulação.... .....	84
3.1.2.4 Simulação.....	89
3.1.2.5 Análise.....	90
3.2 MATERIAL EM PONTA DE ATERRO.....	90
3.2.1 Largura da crista da ensecadeira (e raio da ponta de aterro) .....	91
3.2.1.1 Definição da Geometria.....	91
3.2.1.2 Análise.....	93
3.2.2 Inclinação do Talude.....	94
3.2.2.1 Definição da Geometria.....	94
3.2.2.2 Análise.....	96
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>97</b>
4.1 ESTUDO DE CASO .....	97
4.2 VARIAÇÃO DA LARGURA DA CRISTA DA ENSECADEIRA.....	106
4.3 VARIAÇÃO DA INCLINAÇÃO DO TALUDE DA ENSECADEIRA.....	115
4.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	122
<b>5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>128</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>131</b>
<b>APÊNDICES .....</b>	<b>135</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>142</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Em obras hidráulicas, o manejo do rio durante a sua construção é um fator importante com relação ao seu esquema geral. A construção de maciços de enrocamento em água corrente, as ensecadeiras, com a função de controlar o rio e proporcionar área seca para que as obras permanentes possam ser construídas no leito do rio, é frequentemente uma atividade complexa.

O enrocamento vem sendo largamente utilizado em obras provisórias de desvio de rios devido às suas propriedades naturais, tais como: resistência ao deslocamento pela água, permitindo sua execução em água corrente, facilidade no manuseio, baixo custo e adaptabilidade às condições naturais do leito do rio.

Apesar do custo do fechamento corresponder, geralmente, a uma pequena porcentagem do custo total da obra, deve ser estudado com cuidado, pois uma falha pode causar um atraso sério e custoso no cronograma.

São dois os principais métodos de fechamento de rio: lançamento transversal uniforme, no qual as pedras são lançadas, tanto quanto possível, uniformemente ao longo de toda seção transversal do rio; e lançamento lateral progressivo, quando o enrocamento é lançado de uma margem ou das duas até o fechamento total do rio (ICOLD, 1986; PINTO, 1977; LINFORD, 1967; PEREIRA, 2001).

A escolha da forma de fechamento depende, além das vantagens e desvantagens de cada sistema, de fatores ligados às características do próprio rio como: a qualidade do material rochoso disponível, as finalidades da barragem a construir, equipamentos disponíveis e prazos de execução (PINTO, 1977).

As condições de estabilidade de enrocamento utilizadas no fechamento de rios para a construção de obras hidráulicas envolvem condição crítica de arraste do material sólido lançado em água corrente. Estudos clássicos na área são os trabalhos de Isbash (1936<sup>1</sup>, citado por Pinto, 1977), Blanchet (1946) e do ICOLD (1986).

---

<sup>1</sup> ISBASH, S. V. **Construction of Dams by Depositing Rock in Running Water**. Second Congress on Large Dams, Washington, D. C., 1936.

Estudos disponíveis sobre esse assunto, baseados em métodos aproximados, desenvolvidos por meio de considerações teóricas, observações experimentais de laboratório e de campo, possibilitam que o projetista determine o diâmetro do material necessário para executar o fechamento do rio. Pereira (2001), que estudou experimentalmente as características do escoamento na brecha de fechamento, comenta que é evidente a grande quantidade de variáveis envolvidas no processo de fechamento do rio.

Embora existam pesquisas sobre o comportamento hidráulico no fechamento de rio em lançamento transversal uniforme, não há informações suficientes sobre o escoamento complexo do fechamento em ponta de aterro. A carência de informações sobre esse assunto motivou essa pesquisa que pretende o melhor entendimento do escoamento na região da ponta de aterro para contribuir com os estudos relacionados ao fechamento de rios pelo método lateral progressivo ou em ponta de aterro.

Este trabalho de dissertação foi desenvolvido em cinco capítulos. No capítulo 1 INTRODUÇÃO é estabelecido o assunto, abordados objetivos e estrutura do trabalho. Para conhecer adequadamente o tema, o capítulo 2 REVISÃO DA LITERATURA tem abrangência maior sobre o assunto. O capítulo 3 MATERIAIS E MÉTODOS descreve como será realizado o estudo em questão. O capítulo 4 apresenta os resultados e discussão dos resultados. Por fim, o capítulo 5 apresenta as conclusões e recomendações desta dissertação.

## 1.1 OBJETIVOS

Neste item seguem apresentados os objetivos, geral e específicos, deste trabalho de pesquisa.

### 1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral é o estudo do comportamento hidráulico do escoamento no fechamento de rio pelo método lateral progressivo ou em ponta de aterro por meio do modelo numérico computacional tridimensional: FLOW 3D®.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos do estudo proposto são:

- a) Avaliar e validar o modelo numérico tridimensional escolhido, FLOW 3D®, para as simulações do escoamento em um canal obstruído parcialmente por uma ensecadeira, ou seja, estudos de fechamento de rios;
- b) Analisar, através do modelo numérico tridimensional FLOW 3D®, as características do escoamento, considerando o fechamento do rio em ponta de aterro. Essa análise foi realizada através da tensão tangencial, velocidade e curvatura do escoamento na região da ponta de aterro;
- c) Estudar se a curvatura do escoamento afeta as condições do escoamento na região da ponta de aterro e se essa hipótese for verdadeira, estudar como afeta. Essa análise foi feita através do estudo da alteração de dois parâmetros geométricos da ensecadeira em ponta de aterro: 1) largura da crista (e, portanto raio da ponta de aterro); e 2) inclinação do talude;

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

O dimensionamento de ensecadeiras para o fechamento do rio é usualmente realizado utilizando-se formulações definidas a partir de considerações teóricas e observações experimentais em laboratório e experiências bem sucedidas em protótipo.

O processo de tomada de decisão da solução ótima de engenharia passa, na maioria dos casos, por ensaios em modelo hidráulico reduzido para que se conheçam todos os efeitos envolvidos no processo e no projeto a que se propõe. De qualquer forma, via de regra, as soluções são definidas inicialmente a partir dos conhecimentos teóricos disponíveis sobre o assunto. Quando há possibilidade, ou seja, quando o orçamento e o cronograma da obra permitem, as soluções são testadas e se necessário ajustadas em modelo hidráulico reduzido.

Na sequência são elencados aspectos relevantes envolvidos no dimensionamento de ensecadeiras para o fechamento de rios.

### 2.1 DESVIO DO RIO

O desvio do rio durante a construção de uma obra hidráulica tem a função de proporcionar área seca para que as obras permanentes possam ser construídas no leito do rio com segurança. Para isso duas principais atividades devem acontecer: ensecadeiras devem ser construídas e o fluxo do rio deve ser desviado por uma estrutura especial (túneis, adufas, canais ou parte da estrutura definitiva como o vertedouro) até que a construção permanente esteja completa.

Essas obras de desvio devem compor o projeto global e é importante que sejam baseadas nas condições hidrológicas, topográficas e geológicas do local. Elas podem influenciar a posição e o tipo da barragem e envolvem os principais problemas durante a construção da usina hidroelétrica, afetando, conseqüentemente, o tempo e o custo de toda a obra (ICOLD, 1986).

De maneira usual, as obras de desvio do rio em obras hidráulicas são dimensionadas para um tempo de recorrência de 25 ou 50 anos. Essa escolha

depende do risco admissível de acontecer uma cheia maior do que a suportável pelo projeto da obra de desvio e das possíveis consequências decorrentes da superação da cheia de projeto.

### 2.1.1 Estruturas para o Desvio do Rio

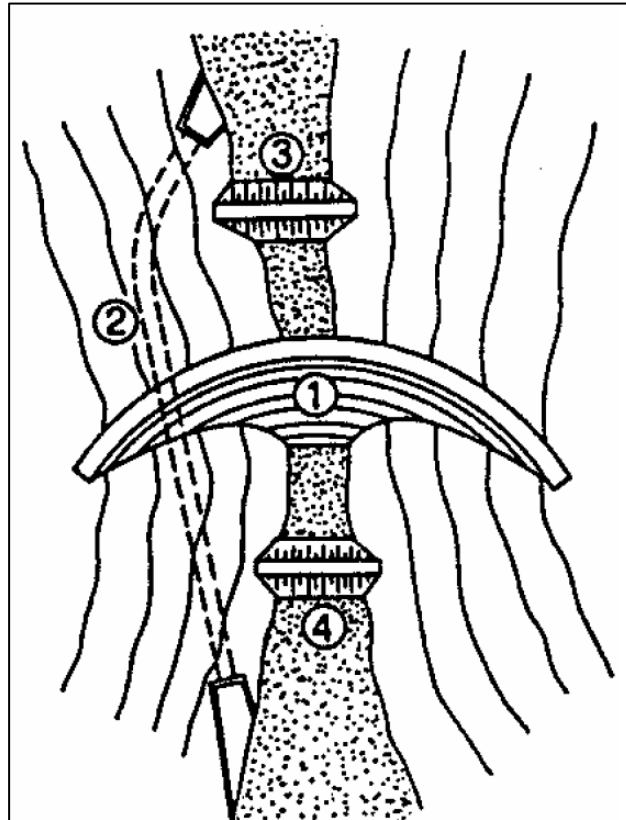
Para que seja possível o fechamento do rio durante a construção das obras permanentes no leito do rio, é necessária a construção de uma estrutura especial como túnel, adufa ou canal.

A escolha da capacidade de descarga da estrutura que vai promover o desvio temporário do rio influencia diretamente na dificuldade do fechamento do rio. Isso porque o nível de água a montante da ensecadeira de fechamento do rio é determinado pela soma da capacidade de descarga da brecha ainda existente no leito natural do rio (antes do fechamento total) e da capacidade de descarga da estrutura de desvio do rio.

A FIGURA 2.1 indica um esquema típico de desvio do rio por túneis. Esse tipo de estrutura tem sua utilização atrelada à qualidade da rocha nas ombreiras do rio. Geralmente a escolha do desvio do rio por túneis é feita em vales estreitos com rios encaixados (ICOLD, 1986).

Outra opção para o desvio temporário do rio é através de canais. Esta solução é comumente utilizada em vales abertos, onde o rio é mais largo e mais plano ou onde a rocha é muito pobre para ser escavada em túnel. Eventualmente, a estrangulação de uma parte da seção do rio para a construção das obras permanentes leva a necessidade de aumentar a capacidade de descarga do rio e, portanto, ocasionalmente, é realizada a escavação da ombreira para aumentar a seção de escoamento, conforme segue representado na FIGURA 2.2.

Outro exemplo, indicado na FIGURA 2.3, é o caso em que há necessidade de fechar completamente o leito do rio e escavar um canal em uma das ombreiras (ROCHA, 2006).

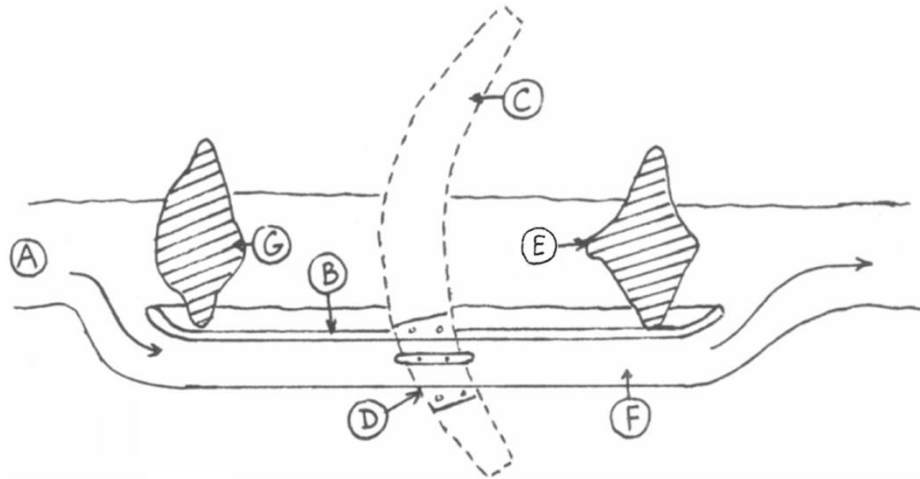


- 1 - Barragem;
- 2 - Túnel de Desvio;
- 3 - Ensecadeira de Montante;
- 4 - Ensecadeira de Jusante.

FIGURA 2.1 – ESQUEMA TÍPICO DE DESVIO DO RIO POR TÚNEIS  
 FONTE: ROCHA (2006)



FIGURA 2.2 – ESQUEMA TÍPICO DE ALARGAMENTO DA CALHA ESTRANGULADA PARA  
 DESVIO DO RIO POR CANAL NA OBRA DE BAIXO IGUAÇU NO RIO IGUAÇU, PARANÁ  
 FONTE: Google Earth (2014)



- A – Escoamento desviado pelo canal de desvio;
- B – Ensecadeira ou septo lateral;
- C – Barragem principal;
- D – Estrutura de controle para o fechamento do sistema de desvio do rio;
- E – Ensecadeira de jusante;
- F – Canal escavado;
- G – Ensecadeira de Montante.

FIGURA 2.3 – ESQUEMA TÍPICO DE DESVIO POR CANAL LATERAL  
 FONTE: ICOLD (1986)

As galerias de desvio são estruturas compactas em concreto que podem ser construídas de maneira isolada ou associada à barragem. Quando são construídas de maneira isolada, funcionam basicamente como os túneis de desvio e geralmente são uma escolha mais adequada nos casos em que a qualidade do maciço rochoso nas ombreiras não é apropriada para a construção de túneis. As galerias associadas à barragem ou ao vertedouro são comumente chamadas de adufas conforme pode ser observado na FIGURA 2.4.



FIGURA 2.4 - DESVIO DO RIO ATRAVÉS DE ADUFAS DE DESVIO  
 FONTE: Agência Estadual de Notícias (2014)

### 2.1.2 Estágios para o Desvio do Rio

A escolha do tipo de desvio a ser utilizado depende de vários fatores como: arranjo geral da barragem, características topográficas e geológicas da área, regime hidrológico da bacia hidrográfica e do tipo e características das obras definitivas a serem construídas. O Comitê Internacional de Grandes Barragens (1986) apresenta os dois principais tipos de desvio:

1. Desvio total do curso de água (através de túneis, adufas ou canais) e construção da obra principal feitos em um único estágio;
2. Desvio parcial do curso de água com execução da obra em etapas.

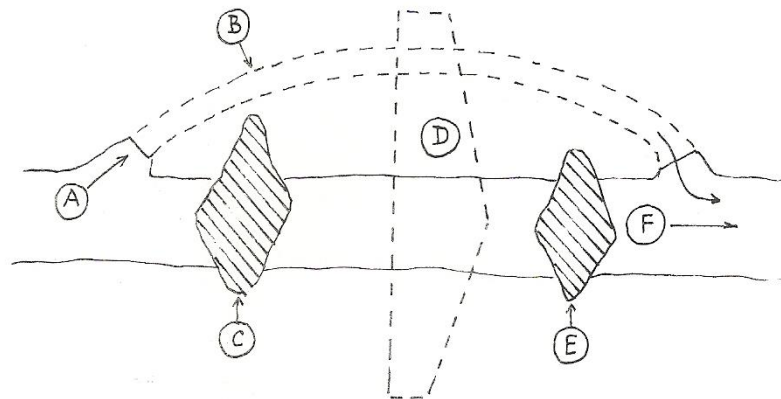
#### 2.1.2.1 Desvio do rio em um único estágio

Utilizado principalmente em vales estreitos, com uma sequência usual de trabalho conforme segue (ICOLD, 1986).

- a) Construção parcial da ensecadeira, permitindo a construção das estruturas de descarga de desvio do rio como canais, túneis, adufas entre outros;

- b) Construção das estruturas de descarga para desvio do rio (uma ou mais passagens podem ser necessárias, então podem ser usadas as duas margens do rio);
- c) Desvio do rio por essas passagens;
- d) Construção da ensecadeira;
- e) Construção das obras permanentes;
- f) Fechamento das passagens de desvio.

A FIGURA 2.5 apresenta um esquema típico de desvio em um único estágio (ICOLD, 1986).



A – Canal de desvio (túnel, canal, entre outros);  
 B – Túnel, canal, entre outros;  
 C – Ensecadeira de montante;

D – Barragem principal a ser construída;  
 E – Ensecadeira de jusante;  
 F – Leito do rio.

FIGURA 2.5 - DESVIO DO RIO EM UM ÚNICO ESTÁGIO  
 FONTE: ICOLD (1986)

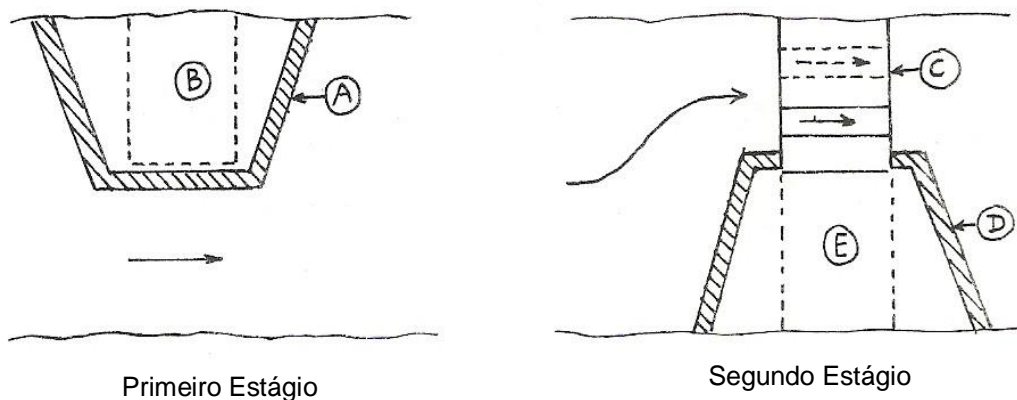
#### 2.1.2.2 Desvio do rio em mais de um estágio

Em rios mais largos, o desvio pode proceder em estágios. A sequência em dois estágios é normalmente (ICOLD, 1986):

- a) Construção da ensecadeira de primeira fase proporcionando uma área seca para a construção de uma parte da barragem principal;
- b) A ensecadeira pode então ser alargada e estendida para aumentar a área seca;
- c) Parte da ensecadeira de primeira fase é destruída para que o rio possa fluir pelas obras permanentes;
- d) Uma ensecadeira de segunda fase é construída;
- e) O restante dos trabalhos permanentes é construído protegido pela ensecadeira de segunda fase.

A extremidade das ensecadeiras em contato com o escoamento deve ser protegido com rocha ou gabião, por exemplo.

As FIGURAS 2.6 e 2.7 exemplificam o desvio de rio com mais de um estágio.



- A – Ensecadeira de primeira fase.
- B – Obras permanentes em construção.
- C – Abertura da barragem (obra permanente) e desvio do rio.
- D – Ensecadeira de segunda fase.
- E – Obras permanentes em construção.

FIGURA 2.6 – DESVIO DO RIO EM DOIS ESTÁGIOS  
FONTE: ICOLD (1986)

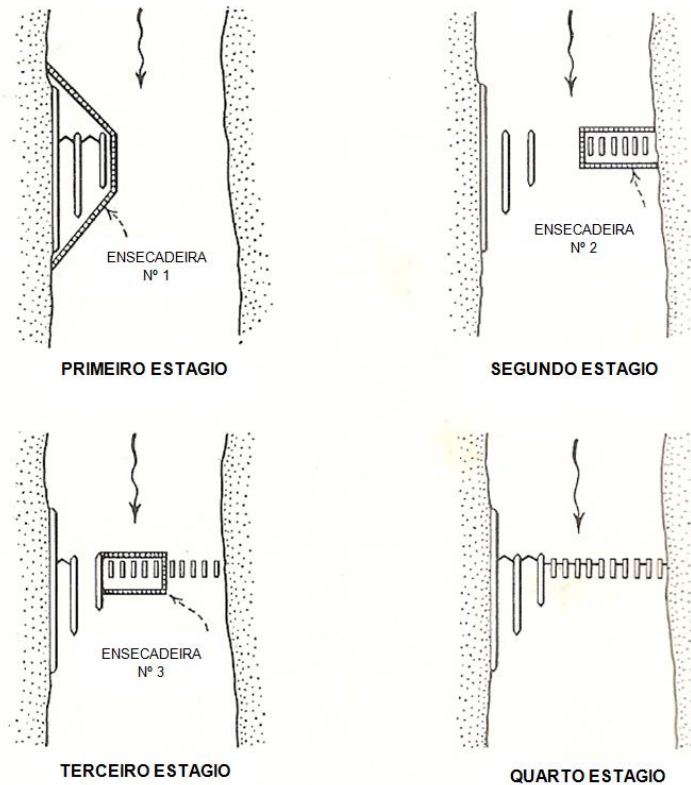


FIGURA 2.7 – DESVIO DO RIO EM MAIS DE DOIS ESTÁGIOS  
 FONTE: WHITE (1940)

Para que o esquema de desvio seja implantado com sucesso é necessário efetuar o fechamento do rio através de ensecadeiras construídas em água corrente. Para tanto, a obra necessita preparar o estoque de enrocamento para o fechamento. No início, o material pode ser fino, mas à medida que o fechamento avança, o escoamento apresenta maior velocidade e maior desnível, dificultando o fechamento, sendo necessário ter um estoque de materiais mais graúdos para a conclusão do fechamento do rio. É justamente nessas fases que o conhecimento do limite de estabilidade de cada material torna-se necessário.

Os materiais mais usados nos fechamentos são de pedreiras, portanto é importante estudar a disponibilidade desse material na região. Materiais mais finos como cascalho podem ser usados em fechamentos mais fáceis ou na fase inicial de fechamentos. Outro material que pode ser utilizado para fechamento é o bloco de concreto, mas este envolve maior custo, portanto, utilizado em caso de falta de material natural.

## 2.2 CONSTRUÇÃO DE ENSECADEIRA EM ÁGUA CORRENTE – FECHAMENTO DE RIOS

Conforme citado anteriormente, são dois os principais métodos de fechamento de rio: lançamento transversal uniforme e lançamento lateral progressivo.

### 2.2.1 Lançamento Transversal Uniforme

Nesse método, as pedras são lançadas, tanto quanto possível, uniformemente ao longo de toda seção transversal do rio, assim o maciço é alteado até a cota desejada. Para isso é necessária a utilização de equipamentos como cabos aéreos, pontes fixas ou flutuantes, guindastes, barcaças, correias transportadoras ou dragas (para materiais de pequenas dimensões).

De acordo com o ICOLD (1986), uma vantagem desse método é que não há necessidade de proteção do leito do rio já que estará automaticamente protegido pelos materiais de fechamento.

Blanchet (1946) descreveu as quatro configurações típicas da seção transversal de uma ensecadeira ao longo do tempo<sup>ii</sup> durante o lançamento transversal uniforme. Linford (1967) e Pinto (1977) discorreram sobre essas descrições que se dividem basicamente em quatro configurações:

**Configuração nº 1:** As pedras lançadas acumulam-se no fundo, resultando em uma seção transversal aproximadamente triangular com taludes inclinados, praticamente seguindo o ângulo de repouso do material. A montante, o nível de água se eleva devido ao obstáculo criado pela ensecadeira, resultando em um aumento das velocidades sobre o enrocamento.

**Configuração nº 2:** Apesar de se seguir o lançamento de pedras, o crescimento em altura do maciço é mais lento, pois as pedras que atingem a crista

---

<sup>ii</sup> Considerando um caso simples com as seguintes condições:

- Canal retilíneo retangular de grande largura (escoamento bidimensional) – fundo plano, fixo, de pequena declividade;
- Escoamento em regime fluvial permanente e uniforme;
- Enrocamento formado por pedras de dimensões uniformes, que não são arrastadas pela corrente na fase inicial da construção;
- Lançamento das pedras em ritmo constante, uniformemente ao longo de toda a largura da seção.

são arrastadas para jusante acumulando-se na zona de separação. Então, ao aglomerarem-se no talude de jusante funcionam como um apoio adicional às pedras da crista tornando-as mais resistentes à velocidade mínima de arraste. Isso propicia condições para que o maciço se desenvolva em altura, com uma forma praticamente trapezoidal, com a superfície superior ligeiramente inclinada. Sua largura aumenta, servindo como base para o acúmulo de novas pedras lançadas e assim, a ensecadeira cresce em volume e em altura. As condições de equilíbrio nessa superfície são mais favoráveis do que na seção triangular, já que as pedras agora possuem apoio lateral. Assim, a elevação do nível de água a montante é uma consequência natural.

**Configuração nº 3:** A deposição das pedras e o crescimento da ensecadeira acontecem de jusante para montante. O escoamento é caracterizado por uma zona de aceleração no entorno da crista e um trecho em regime uniforme que se estende até jusante (FIGURA 2.8).

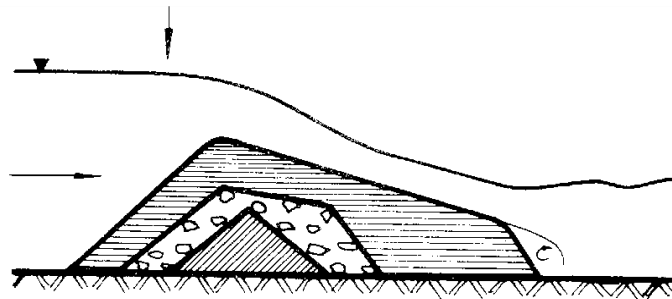


FIGURA 2.8 – CONFIGURAÇÃO Nº 3 DURANTE A FORMAÇÃO DE UMA ENSECADDEIRA DE ENROCAMENTO EM LANÇAMENTO TRANSVERSAL UNIFORME  
FONTE: PINTO (1977)

As três configurações apresentadas são referentes à condição de vazão constante, que raramente acontece nos estudos de desvio de rio, já que, à medida que se obtém um aumento do nível de água por efeito da ensecadeira, as águas são gradativamente desviadas através das obras de desvio, diminuindo assim a capacidade de transporte do escoamento. Desta forma, quando a vazão diminui ao longo do processo construtivo, faz-se referência a uma quarta configuração típica (PINTO, 1977).

**Configuração nº 4:** Como ocorre redução da vazão, o maciço não se alonga mais, as pedras se acumulam em taludes mais íngremes e emergem quando cessa a vazão (FIGURA 2.9).

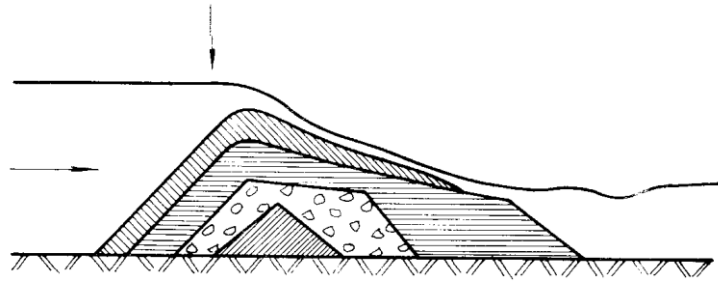


FIGURA 2.9 – CONFIGURAÇÃO N<sup>o</sup> 4 DURANTE A FORMAÇÃO DE UMA ENSECADEIRA DE ENROCAMENTO EM LANÇAMENTO TRANSVERSAL UNIFORME  
FONTE: PINTO (1977)

### 2.2.2 Lançamento Lateral Progressivo

O lançamento lateral progressivo, também chamado de em ponta de aterro, é o tipo de fechamento mais executado no Brasil. O lançamento do enrocamento pode acontecer a partir de uma ou das duas margens até que se consiga o fechamento da seção do rio, e seu coroamento é completado posteriormente. O aterro é largo o suficiente para permitir acesso ao maquinário e o seu topo na fase de fechamento é usualmente um metro acima do nível de água a montante (PINTO, 1977).

A FIGURA 2.10 ilustra a configuração típica do fechamento de rio pelo método lateral progressivo.

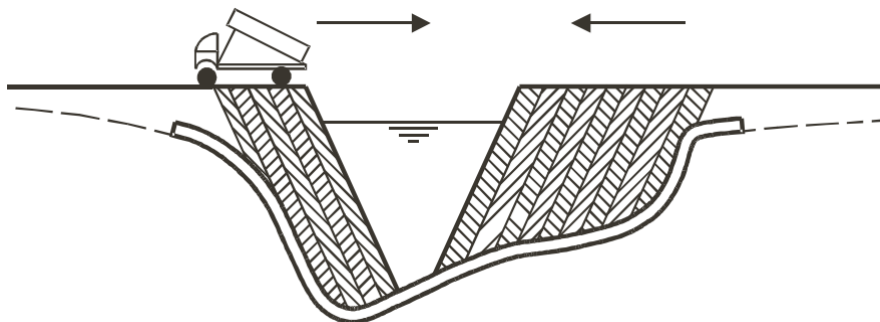


FIGURA 2.10 – CONFIGURAÇÃO TÍPICA DO FECHAMENTO DE RIO PELO MÉTODO LATERAL PROGRESSIVO  
FONTE: CIRIA; CUR; CETMEF (2007)

Este tipo de fechamento do rio pode ser caracterizado em três estágios principais. Durante o primeiro estágio, o escoamento na região da ensecadeira de

fechamento do rio é subcrítico, o desnível entre o nível de água a montante ( $y_{\text{montante}}$ ) e o nível de água a jusante ( $y_{\text{montante}}$ ) da enseadeira é moderado, assim como as velocidades na região da brecha de fechamento do rio. Neste estágio, na prática, os desníveis entre o nível de água a montante e o nível de água a jusante são no máximo da ordem de 2 metros e materiais de menor diâmetro são suficientes para garantir o avanço da ponta de aterro na seção do rio. A FIGURA 2.11 ilustra a configuração típica do primeiro estágio de fechamento do rio pelo método lateral progressivo (CIRIA; CUR; CETMET, 2007).

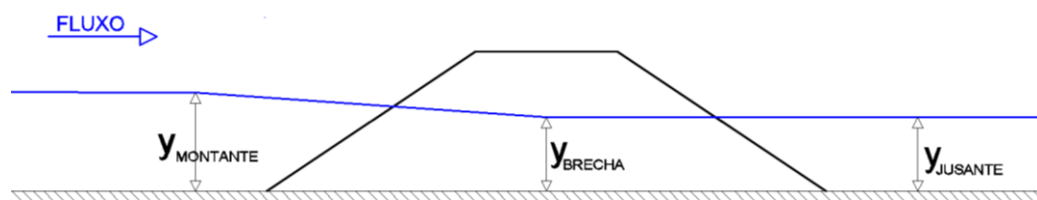


FIGURA 2.11 – CONFIGURAÇÃO DO PRIMEIRO ESTÁGIO DE FECHAMENTO DE RIO PELO MÉTODO LATERAL PROGRESSIVO  
FONTE: O AUTOR (2015)

Durante o segundo estágio de fechamento, ilustrado pela FIGURA 2.12, há escoamento supercrítico. O nível de água na brecha é o nível de água crítico (controle). Neste estágio, na prática, o desnível entre o nível de água a montante da brecha e o nível de água a jusante da brecha é da ordem de 3 a 4 metros. Então, há necessidade de blocos mais pesados para permitir o fechamento do rio e ainda assim há possibilidade de perda de material, ou seja, alguma quantidade de material será arrastada pelo escoamento na brecha (CIRIA; CUR; CETMET, 2007).

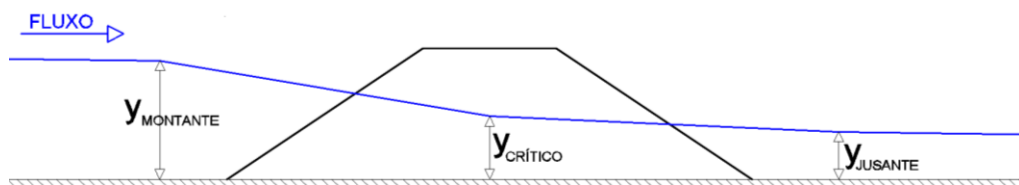


FIGURA 2.12 – CONFIGURAÇÃO DO SEGUNDO ESTÁGIO DE FECHAMENTO DE RIO PELO MÉTODO LATERAL PROGRESSIVO  
FONTE: O AUTOR (2015)

Na etapa final de fechamento do rio pelo método lateral progressivo, ou ponta de aterro, a maior parte da vazão já foi desviada pela estrutura de descarga

definida para o desvio do rio (adufas de desvio, túneis de desvio, canal de desvio, entre outros) e a vazão que passa pela brecha da ensecadeira é mínima. Esta é a etapa de conclusão do fechamento do rio (CIRIA; CUR; CETMET, 2007).

Na sequência são apresentadas figuras do fechamento do Rio Madeira para a construção da UHE Santo Antonio de maneira a exemplificar um fechamento de rio em ponta de aterro. Essas figuras ilustram de maneira mais detalhada a execução de um fechamento em ponta de aterro com material de enrocamento. Na FIGURA 2.13 a ponta de aterro está a poucos metros de promover o fechamento total do rio. A FIGURA 2.14 representa o momento do fechamento total da seção do rio.



FIGURA 2.13 - FECHAMENTO DO CORDÃO DE ENROCAMENTO DO LEITO DO RIO MADEIRA PARA A CONSTRUÇÃO DA UHE SANTO ANTÔNIO (PORTO VELHO – RONDÔNIA)  
FONTE: SANTO ANTONIO ENERGIA, 2014



FIGURA 2.14 – CONCLUSÃO DO FECHAMENTO DO CORDÃO DE ENROCAMENTO DO LEITO DO RIO MADEIRA PARA A CONSTRUÇÃO DA UHE SANTO ANTÔNIO (PORTO VELHO – RONDÔNIA)

FONTE: SANTO ANTONIO ENERGIA, 2014

## 2.3 EQUAÇÕES FUNDAMENTADAS EM ESTUDOS TEÓRICO-EXPERIMENTAIS

Na sequência são apresentados os métodos mais conhecidos e largamente utilizados para o estudo de fechamento de rio baseados em estudos teórico-experimentais.

### 2.3.1 Equações fundamentadas na Velocidade Crítica

Os métodos de Isbash e Blanchet tentam solucionar problemas práticos de projetos de fechamento de rio em obras hidráulicas. Para isso baseiam-se em considerações teóricas e observações experimentais de campo e de laboratório e utilizam hipóteses simplificadoras tentando generalizar os resultados e deixá-los ao alcance dos projetistas. Sua finalidade é calcular as dimensões do material para fechamento do rio e estudar a configuração da seção transversal da ensecadeira e os correspondentes níveis de água em cada uma das configurações. Consideram-se conhecidos a vazão e a profundidade do rio e o peso específico e dimensões do enrocamento de granulometria uniforme (PINTO, 1977).

Tanto Isbash (em 1936) quanto Blanchet (em 1946) utilizaram o processo de lançamento transversal uniforme para a construção de barragens em seus estudos. Entretanto, os conhecimentos adquiridos são aceitos também para o cálculo do

lançamento do enrocamento pelo processo em ponta de aterro (CURI, 1986; PEREIRA, 2001).

### 2.3.1.1 Método de Isbash

A dimensão das pedras para garantir a formação de enrocamento estável pode ser determinada através das equações que são apresentadas na sequência.

Velocidade crítica de arraste de pedras em água corrente (ISBASH, 1936<sup>iii</sup>, citado por Pinto, 1977).

$$V_m = Y'_d \sqrt{2g \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma}} \sqrt{d} \quad (2.1)$$

$$V_M = Y_d \sqrt{2g \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma}} \sqrt{d} \sqrt{f' \cos \alpha \sin \alpha} \quad (2.2)$$

- onde:
- $V_m$  = velocidade crítica de arrastamento para pedra sem apoio lateral (m/s);
  - $V_M$  = velocidade crítica de arrastamento para pedra com apoio lateral (m/s);
  - $Y'_d$  = coeficiente obtido experimentalmente que representa pedras sem apoio lateral;
  - $Y_d$  = coeficiente obtido experimentalmente que representa pedras com apoio lateral;
  - $g$  = aceleração da gravidade (m/s<sup>2</sup>);
  - $\gamma_s$  = peso específico do material (kgf/m<sup>3</sup>);
  - $\gamma$  = peso específico da água (kgf/m<sup>3</sup>);
  - $d$  = diâmetro nominal do material - diâmetro da esfera de mesmo volume (m);
  - $f'$  = coeficiente numérico;

<sup>iii</sup> ISBASH, S. V. **Construction of Dams by Depositing Rock in Running Water**. Second Congress on Large Dams, Washington, D. C., 1936.

$\alpha$  = ângulo que faz o plano da superfície de fundo com a horizontal (graus).

Isbash (1936<sup>iv</sup>, citado por Pinto, 1977) cita duas posições da pedra com relação a seu apoio sobre as demais conforme esquematizado na FIGURA 2.15.

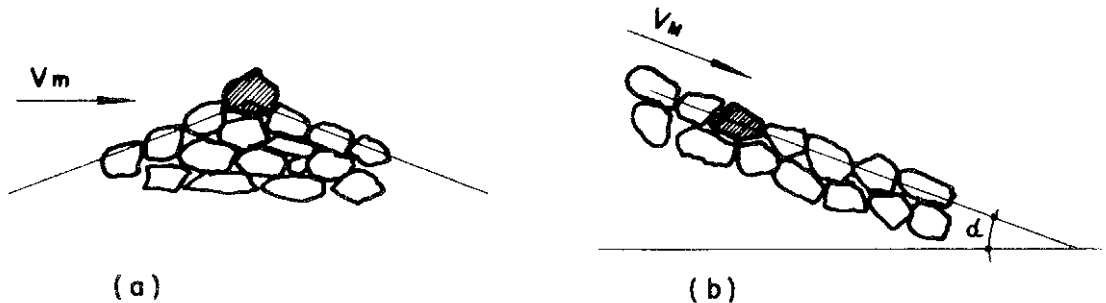


FIGURA 2.15 – DIFERENTES POSIÇÕES DAS PEDRAS EM UMA ENSECADEIRA DE ENROCAMENTO  
FONTE: PINTO (1977)

Na primeira posição, FIGURA 2.15(a), a pedra não tem apoio lateral. A velocidade crítica de arrastamento ( $V_m$ ) para essa condição é dada pela Equação 2.1 com  $Y'_d = 0,86$ , obtido experimentalmente. A segunda posição, FIGURA 2.15(b), é a situação típica nas demais configurações, quando a pedra está no mesmo plano de suas vizinhas apresentando maior resistência de arraste pelo fluxo. A velocidade crítica dessa posição ( $V_M$ ) é dada pela Equação 2.2 com  $Y_d = 1,2$  obtido experimentalmente (PINTO, 1977).

Para a situação específica de barragens, o ângulo  $\alpha$  indicado na Equação 2.2 é em geral muito pequeno, pode-se então considerar  $\sqrt{f' \cos \alpha \sin \alpha} = 1$ . Portanto, a Equação 2.2 pode ser reescrita conforme a seguir:

$$V_M = Y_d \sqrt{2g \frac{Y_s - Y}{\gamma} \sqrt{d}} \quad (2.3)$$

<sup>iv</sup> ISBASH, S. V. **Construction of Dams by Depositing Rock in Running Water**. Second Congress on Large Dams, Washington, D. C., 1936.

Considerando os valores  $Y'_d = 0,86$  e  $Y_d = 1,2$  e para  $\frac{Y_s - Y}{Y} = 1,65$ , as Equações 2.1 e 2.3 podem ser reduzidas às Equações 2.4 e 2.5, respectivamente.

$$V_m = 5\sqrt{d}. \quad (2.4)$$

$$V_M = 7\sqrt{d} \quad (2.5)$$

A partir da Equação 2.6 apresentada a seguir obtém-se a Equação 2.7:

$$v = \sqrt{2g\Delta h} \quad (2.6)$$

$$\frac{v^2}{2g} = \Delta h \quad (2.7)$$

onde:  $v$  = velocidade média do escoamento (m/s);  
 $g$  = aceleração da gravidade (m/s<sup>2</sup>);  
 $\Delta h$  = desnível na seção estrangulada pela ensecadeira (m).

Assim, substituindo-se a Equação 2.5 na Equação 2.7, tem-se:

$$\frac{(7\sqrt{d})^2}{2g} = \Delta h \therefore \frac{49d}{2g} = \Delta h$$

$$d = 0,4 \Delta h \quad (2.8)$$

As Equações 2.4, 2.5 e 2.8 são bastante usuais para o dimensionamento do enrocamento necessário em fechamento de rios.

### 2.3.1.2 Método de Blanchet

Através de uma extensa análise experimental das características das ensecadeiras, Blanchet aperfeiçoou o método de Isbash (CURI, 1986).

O método de Blanchet difere do proposto por Isbash, principalmente, por considerar a recuperação de energia cinética a jusante da barragem. (PINTO, 1977, p. 19).

Blanchet propôs a Equação 2.9 que relaciona a velocidade crítica de arraste com o diâmetro do bloco necessário para o fechamento do rio.

$$V_M = Y \sqrt{2g \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma}} \sqrt{d} \sqrt{\sin(\alpha_o - \alpha)} \quad (2.9)$$

onde:  $V_M$  = velocidade crítica de arrastamento para pedra com apoio lateral (m/s);  
 $Y$  = coeficiente obtido experimentalmente;  
 $g$  = aceleração da gravidade (m/s<sup>2</sup>);  
 $\gamma_s$  = peso específico do material (kgf/m<sup>3</sup>);  
 $\gamma$  = peso específico da água (kgf/m<sup>3</sup>);  
 $d$  = diâmetro nominal do material - diâmetro da esfera de mesmo volume (m);  
 $\alpha_o$  = ângulo de repouso do material em água parada (graus);  
 $\alpha$  = ângulo que faz o plano da superfície de fundo com a horizontal (graus).

Para o caso de declividades pequenas ou nulas, a Equação 2.9 equivale a Equação 2.3 proposta por Isbash (PINTO, 1977).

### 2.3.1.3 Método de Bouvard

Bouvard (1960) propôs a Equação 2.10, puramente empírica, muito semelhante a Equação 2.5 de Isbash e relaciona a velocidade média do escoamento com o diâmetro do material.

$$v = 6,71 \sqrt{d} \quad (2.10)$$

onde:  $v$  = velocidade média do escoamento (m/s);  
 $d$  = diâmetro nominal do material - diâmetro da esfera de mesmo volume (m).

### 2.3.2 Equações fundamentadas no Esforço Tangencial Crítico

A tensão tangencial crítica é um resultado das forças da água tentando mover a partícula na direção do fluxo (GRAF, 1970). Committee (1966) sugere o uso da tensão tangencial crítica ao invés da velocidade crítica para o estudo da ação erosiva da água no leito. Comenta ainda que a vantagem em utilizar o esforço trativo para especificar as condições críticas é que ele é o único parâmetro necessário, enquanto que a velocidade deve sempre ser associada à profundidade ou à posição em que foi observada.

O perfil vertical de velocidades para um fluxo bidimensional com superfície livre sobre um leito plano de sedimentos é dado pela Equação 2.11 (COMMITTEE, 1966).

$$\frac{u}{U_*} = a_r \left( \frac{U_* k_s}{\nu} \right) + 5,75 \log \frac{y}{k_s} \quad (2.11)$$

onde:  $u$  = velocidade a uma distância  $y$  acima do fundo (m/s);

$$U_* = \text{velocidade de corte} = \sqrt{\frac{\tau_c}{\rho}};$$

função do número de Reynolds de corte ( $R_e^*$ ), obtido

$$a_r = \text{experimentalmente} \left( R_e^* = \frac{U_* k_s}{\nu} \right);$$

$k_s$  = dimensão característica da rugosidade do sedimento (m);

$\nu$  = viscosidade cinemática do fluido ( $\nu = \mu/\rho$ ) ( $\text{m}^2/\text{s}^2$ );

$\tau_c$  = esforço tangencial crítico ( $\text{kgf}/\text{m}^2$ );

$\rho$  = densidade do fluido ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );

$\mu$  = viscosidade dinâmica do fluido (Poise =  $\text{g}/(\text{cm}\cdot\text{s})$ );

$y$  = profundidade em relação ao fundo do leito (m).

A Equação 2.11 mostra que se dois fluxos de diferentes profundidades possuem leitos de sedimentos idênticos e a mesma tensão tangencial no fundo, as velocidades a qualquer distância “ $y$ ” acima do fundo serão também as mesmas nos dois escoamentos. Entretanto, como a velocidade média ocorre a uma fração constante da profundidade, o escoamento mais profundo terá velocidade média maior. Dessa forma, fica claro que a velocidade média somente não consegue

expressar a ação erosiva da água no leito e que para especificar as condições em sua totalidade, a profundidade deve ser considerada (COMMITTEE, 1966).

A FIGURA 2.16 apresentada pelo Committee (1966) e complementada por Pinto (1997) mostra a velocidade crítica versus tamanho médio do sedimento para algumas bibliografias. A variabilidade destes resultados faz com que seja recomendado, sempre que possível, utilizar o critério da tensão tangencial crítica.

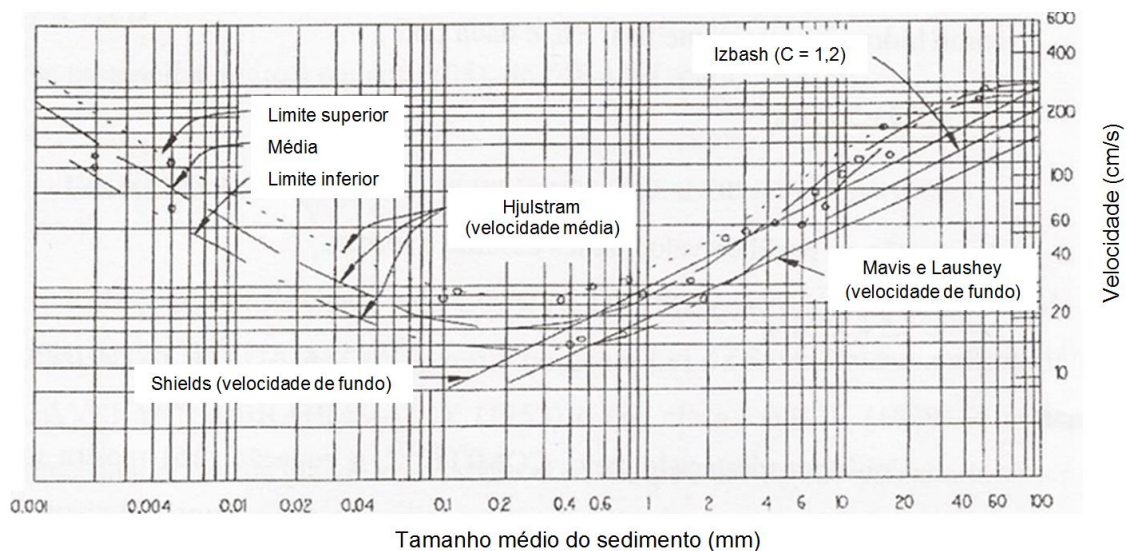


FIGURA 2.16 – VELOCIDADES CRÍTICAS PARA SEDIMENTO DE QUARTZO EM FUNÇÃO DO DIÂMETRO MÉDIO DO GRÃO  
 FONTE: COMMITTEE (1966)

A relação da condição limite de arrastamento ao esforço tangencial crítico junto ao fundo parece ter sua origem em Du Boys (1879<sup>v</sup>, citado por Pinto, 1977) que indicou essa relação através da Equação 2.12.

$$\tau_c = \xi (\gamma_s - \gamma) d \quad (2.12)$$

onde  $\xi$  é um coeficiente experimental e demais variáveis já definidas anteriormente.

White (1940) se preocupou em analisar a condição crítica considerando o equilíbrio de um único grão e evidenciou a importância do ângulo de repouso na análise da tensão tangencial (HENDERSON, 1966).

<sup>v</sup> Rouse, H. **Fluid Mechanics for Hydraulic Engineers**. Mc Graw-Hill Book Co. Inc., New York, 1938.

White (1940) propôs, em condições de escoamento independentes da viscosidade, para material granular ( $S_s = 2,65$ ) e ângulo de atrito interno igual a  $45^\circ$  sobre leito plano e horizontal (PINTO, 1977), a Equação 2.13.

$$\tau_c = 192 d \quad (2.13)$$

Entretanto, Kalinske (1974<sup>vi</sup>, citado por Pinto, 1977) propõe a Equação 2.14 que indica que a Equação 2.13 é três vezes menor.

$$\tau_c = 64 d \quad (2.14)$$

De qualquer forma, os resultados experimentais mais aceitos quanto à condição de tração crítica são os de Shields (1936), cujo parâmetro refere-se ao movimento de partículas de diâmetro “d” sobre outras de mesmo tamanho. Seu diagrama é apresentado na FIGURA 2.17. Com o aumento do número de Reynolds de corte da partícula, há uma tendência de manutenção da relação  $\frac{v^{*2}}{(S_s-1)gd}$  igual ao valor 0,056.

---

<sup>vi</sup> Kalinske, A. A. **Movement of Sediment as Bed Load in Rivers**, Transactions American Geophysical Union, V. 28, Aug. 1947.

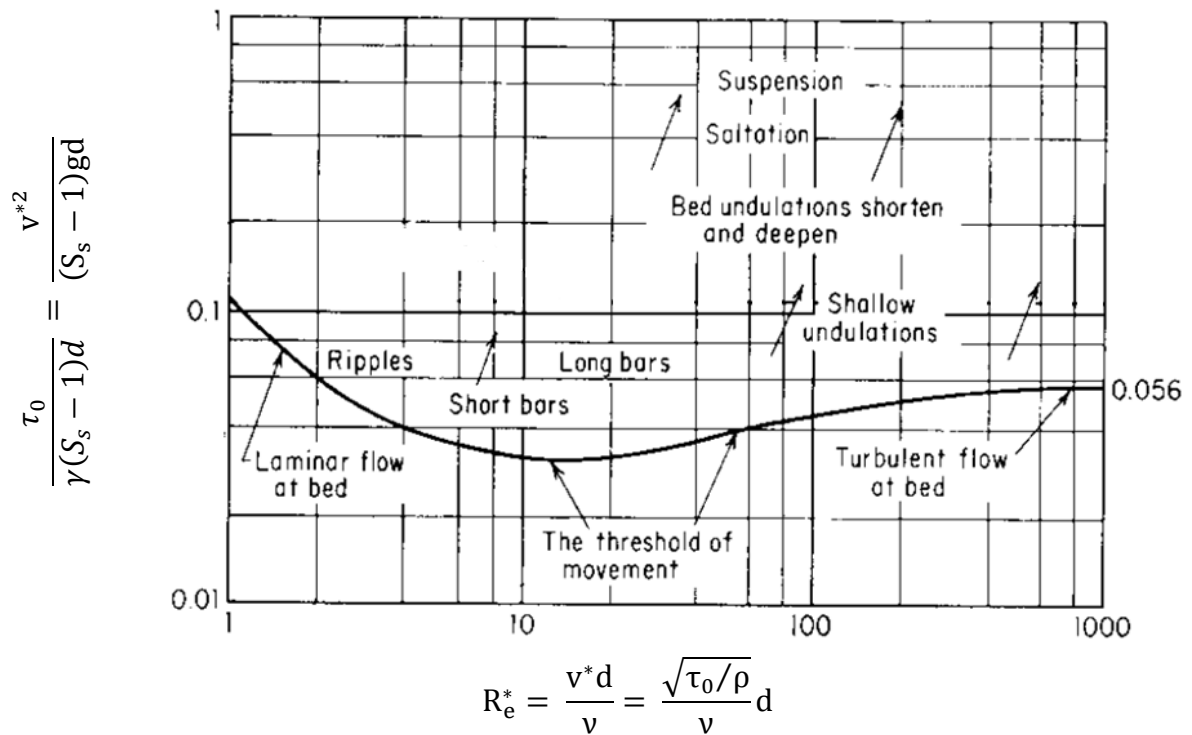


FIGURA 2.17 – DIAGRAMA DE SHIELDS  
 FONTE: HENDERSON (1966)

Igualando a equação  $\frac{\tau_0}{\gamma(S_s - 1)d}$  ao valor constante igual a 0,056 e fazendo  $S_s = 2,65$  e  $\gamma = 1000 \text{ kg/m}^3$ , tem-se:

$$\frac{\tau_0}{1000(2,65 - 1)d} = 0,056$$

$$\tau_{0c} = 92,4 d \quad (2.15)$$

onde:  $\tau_0$  = esforço tangencial junto ao leito;  
 $\tau_{0c}$  = esforço tangencial crítico junto ao leito;  
 $d$  = diâmetro nominal do material;  
 $S_s$  = densidade relativa do material de enrocamento ( $S_s = 2.65$ );  
 $\gamma$  = peso específico da água ( $\gamma = 1000 \text{ kg/m}^3$ ).

Conforme FIGURA 2.17, essa relação se aplica a  $R_e^* > 500$ .

Apesar da solidez aparente e larga aplicação do critério da tensão crítica e dos resultados experimentais de Shields, Carson e Griffiths (1985) comentam sobre

a discordância de diversas equações empíricas que relacionam o esforço trativo crítico e o tamanho das partículas.

Recentemente, tentativas de quantificar essas relações produziram divergências da clássica expressão sugerida por Shields (1936). Em parte esses conflitos refletem as dificuldades de se definir e medir o esforço trativo bem como a definição do início do movimento da partícula. De qualquer forma, grande parte dessas divergências refletem o fato de que diferentes amostras foram ensaiadas com diferentes finalidades implícitas (CARSON E GRIFFITHS, 1985).

### 2.3.2.1 Estudos de Pedrolli

Pedrolli (1963) foi um dos primeiros pesquisadores a estudar o transporte de sedimentos em leitos fixos lisos. Ele indicou a influência da declividade  $S$  e obteve a condição incipiente como caso limite para taxa nula de transporte do sólido indicada pela Equação 2.16.

$$\tau_c = 0,53 \frac{\gamma_s v^{2/5}}{g^{1/5}} d^{2/5} S^{1/4} \quad (2.16)$$

onde:

- $\tau_c$  = esforço tangencial crítico (kgf/m<sup>2</sup>);
- $\gamma_s$  = peso específico do material (kgf/m<sup>3</sup>);
- $\nu$  = viscosidade cinemática do fluido (m<sup>2</sup>/s);
- $g$  = aceleração da gravidade (m/s<sup>2</sup>);
- $d$  = diâmetro nominal do material (m);
- $S$  = declividade (m/m).

A condição incipiente ou crítica é interpretada como o início do transporte. Não existe um momento em que o movimento geral dos grãos acontece repentinamente, mas sim inicialmente uma situação onde, a cada segundo, um grão é arrastado do leito, então a velocidade aumenta e o arraste dos grãos se torna mais frequente até que se torna geral por todo o leito (HENDERSON, 1966).

### 2.3.2.2 Estudos de Novak e Nalluri

Novak e Nalluri (1984) estudaram o movimento incipiente de partículas isoladas de sedimentos sobre canais fixos e lisos e propuseram as seguintes equações:

$$\Psi_{OC} = 0,065 Re_*^{-0,52} \text{ para canais retangulares} \quad (2.17)$$

$$\Psi_{OC} = 0,060 Re_*^{-0,60} \text{ para canais circulares} \quad (2.18)$$

sendo:  $\Psi_{OC}$  = tensão tangencial adimensional crítica;  
 $Re_*$  = número de Reynolds de corte da partícula.

E ainda a Equação 2.19 válida para escoamentos com superfície livre em leitos lisos com qualquer forma de canal.

$$\frac{V_c}{\sqrt{gd(Ss - 1)}} = 0,61 \left(\frac{d}{R}\right)^{-0,27} \quad (2.19)$$

sendo:  $V_c$  = velocidade crítica (m/s);  
 $R$  = raio hidráulico (m);  
 $S_s$  = densidade relativa do material do enrocamento.

Ota e Nalluri (2004) comentam que, apesar do critério de Shields (1936) ser clássico apenas para o caso de leitos móveis, a condição incipiente sobre leitos fixos é regida pela mesma lei física que define a condição incipiente sobre leitos móveis. Portanto, Ota e Nalluri (2004) consideram que o uso da tensão tangencial adimensional crítica como feito por Shields (1936) é a melhor forma, também, para leitos fixos, desde que introduza uma compensação devido à rugosidade do leito fixo.

Como o parâmetro de Shields refere-se a movimentos de partículas de diâmetro “d” sobre outras de mesmo tamanho, houve a necessidade de compensar quando o diâmetro “k” da rugosidade do leito é menor do que “d”, já que neste caso o ângulo de repouso é sensivelmente menor.

Para esta compensação, Ota (1999) concluiu que a tensão de cisalhamento adimensional ( $\psi$ ), dada pela Equação 2.20, deve ser compensada multiplicando  $\psi$  por  $(d/k)^{2/3}$ .

$$\psi = \frac{\tau}{\rho g d (S_s - 1)} = \frac{U_*^2}{g d (S_s - 1)} \quad (2.20)$$

onde:  $\psi$  = tensão tangencial adimensional;  
 $\tau$  = esforço tangencial (kgf/ m<sup>2</sup>);  
 $U_*$  = velocidade de corte.

Definindo  $\psi_K$  como tensão tangencial adimensional incipiente de areia (obtida do diagrama de Shields), obtém-se a Equação 2.21, onde  $\psi_C$  é a tensão tangencial crítica (transporte incipiente):

$$\psi_C \left(\frac{d}{k}\right)^{2/3} = \psi_K \quad (2.21)$$

Considerando válida a Equação 2.21 para qualquer diâmetro de rugosidade, Ota (1999) definiu a condição incipiente para cada valor de  $d/k$ , conforme a FIGURA 2.18. Observa-se que, indiretamente Ota (1999) considerou o efeito do ângulo de repouso do material.

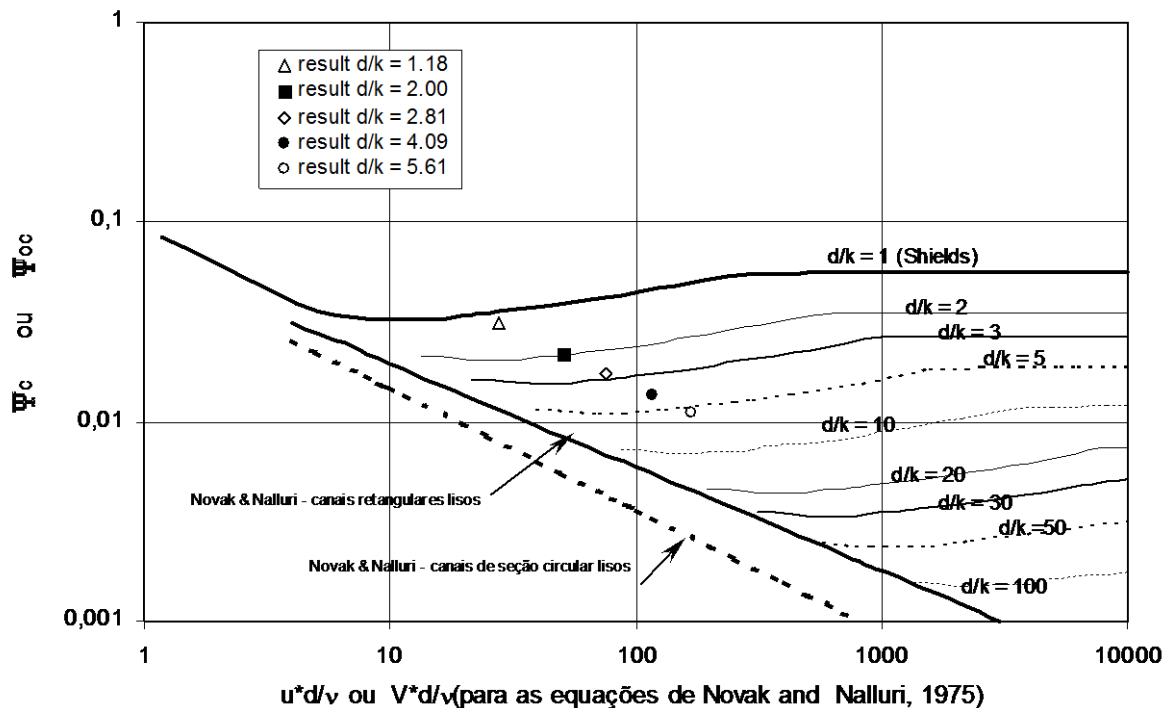


FIGURA 2.18 – DIAGRAMA DE SHIELDS COM CONDIÇÕES INCIPIENTES PARA LEITOS FIXOS LISOS E RUGOSOS  
 FONTE: OTA e NALLURI (2004)

Os estudo de Ota (1999) e Ota e Nalluri (2004) são citados para chamar atenção que pedras de diâmetro “d” lançadas sobre um maciço de pedras de diâmetro menor “k” são menos estáveis. Por exemplo, na troca de material lançado. Nessa linha, a estabilidade do enrocamento lançado sobre leito liso é bem menor do que a estabilidade do enrocamento lançado sobre leito rugoso.

## 2.4 ESTUDOS EM MODELO HIDRÁULICO REDUZIDO

Devido à grande quantidade de parâmetros e efeitos envolvidos nos estudos de fechamento e desvio do rio, é comum sempre que possível utilizar modelos hidráulicos reduzidos para determinar as características, dificuldades e soluções do projeto escolhido de fechamento e desvio do rio.

Para exemplificar os estudos de fechamento do rio em modelo hidráulico reduzido, alguns estudos experimentais realizados no Centro de Hidráulica e Hidrologia Professor Parigot de Souza – CEHPAR para o fechamento do Rio Paraná para viabilizar a construção da Usina Hidroelétrica de Itaipu são apresentados.

#### 2.4.1 Fechamento do Rio Paraná – Usina Hidroelétrica de Itaipu

A Usina Hidroelétrica de Itaipu é binacional e está localizada no Rio Paraná na fronteira entre o Brasil e o Paraguai. Foi construída no período de 1974 a 1982, possui 20 unidades geradoras e 14.000 MW de potência instalada. Itaipu atende cerca de 20% do consumo brasileiro e 75% da energia consumida no Paraguai (ITAIPU BINACIONAL, 2014).

Foram estudados em modelo hidráulico reduzido diversos eixos de pré-ensecadeiras para o fechamento do rio Paraná considerando diversas configurações possíveis tais como: fechamento da margem direita para a margem esquerda ou da margem esquerda para a margem direita; um ou dois cordões de fechamento e também fechamento lateral progressivo ou transversal uniforme. Para fins de exemplificação, são detalhados dois dos ensaios realizados:

##### Fechamento Eixo 1

###### **- Características do Ensaio:**

Vazão:  $Q = 12.000 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Nível a jusante: NA. R3 = 102 m.

Tipo de fechamento: Através do alinhamento chamado de “Eixo 1” (FIGURA 2.19). Avanço em ponta de aterro, da margem esquerda para a margem direita.

**- Sistemática do Ensaio:** O fechamento foi iniciado com material denominado “AREIA” ( $d < 0,12 \text{ m}$  no protótipo) sem ritmo definido de deposição efetuando-se, contudo, frequentes interrupções para avaliar as condições do material na ponta de aterro. Seguiu-se método idêntico nas fases iniciais de deposição para, mais ao final de cada etapa, efetuar-se o lançamento com ritmo igual a  $55,55 \text{ cm}^3$  a cada 20 segundos, equivalente em protótipo à deposição de  $1.000 \text{ m}^3$  por hora.

Para todos os tipos de material, o avanço foi interrompido ao se atingir o limite de estabilidade do material na ponta de aterro.

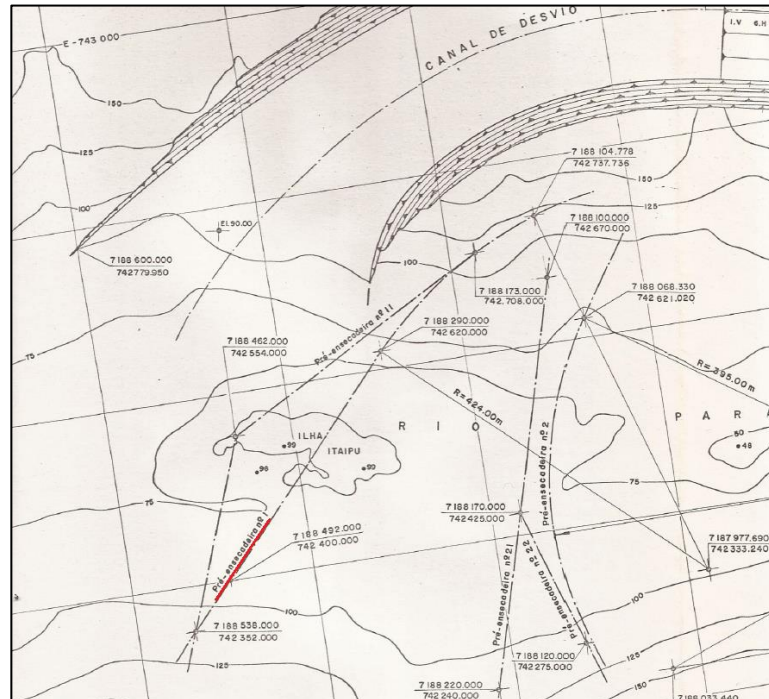


FIGURA 2.19 – AVANÇO EM PONTA DE ATERRO DA MARGEM ESQUERDA PARA A MARGEM DIREITA NO ESTUDO DO FECHAMENTO DO RIO PARANÁ NO EIXO 1 PARA CONSTRUÇÃO DA ITAIPU  
 FONTE: CEHPAR (1976)

- **Principais Observações:** Ao se atingir o limite de estabilidade do material tipo IV ( $0,95 \text{ m} < d < 1,27 \text{ m}$  no protótipo), tentou-se avanço adicional utilizando “CUBOS”, que são materiais pré-moldados de concreto em forma de cubo. Apesar disso, essa operação não foi concluída por não haver disponibilidade de material em quantidade suficiente para que se atingisse o avanço correspondente ao seu limite de estabilidade. De qualquer modo, a impressão foi de que somente seria viável pequena progressão adicional com esse material.

As FIGURAS 2.20 e 2.21 apresentam imagens que ilustram o ensaio de Fechamento do rio em ponta de aterro no Eixo 1.

Com o objetivo de garantir o entendimento rápido e fácil dos ensaios em modelo reduzido, os resultados são comumente apresentados de maneira resumida em forma de figuras e tabelas. A FIGURA 2.22 apresenta um corte pelo eixo da enseadeira de enrocamento indicando os materiais necessários em cada estaqueamento para possibilitar o fechamento do rio. Informações mais detalhadas como velocidades máximas na ponta de aterro, localização da velocidade máxima, estaca onde foi necessário realizar a troca de material para continuar o fechamento

do rio e largura da brecha faltante para conclusão do fechamento aparecem na tabela resumo, TABELA 2.1.



FIGURA 2.20 – CONDIÇÕES DE ESCOAMENTO – LIMITE DE ESTABILIDADE DO MATERIAL IV NO ESTUDO DO FECHAMENTO DO RIO PARANÁ NO EIXO 1  
FONTE: CEHPAR (1976)

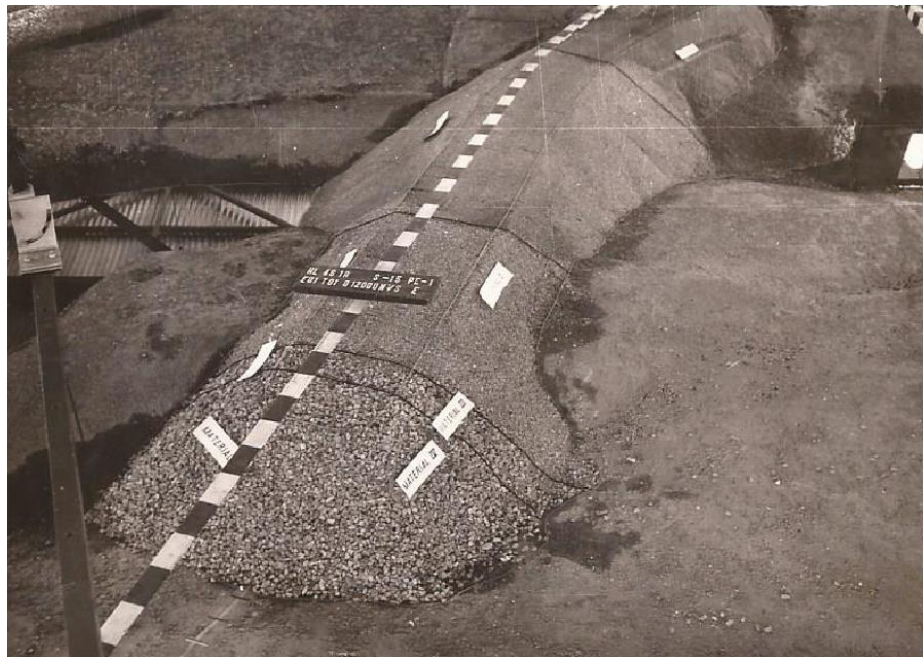


FIGURA 2.21 – CONFIGURAÇÃO RESULTANTE DA PRÉ-ENSECADEIRA Nº 1 NO ESTUDO DO FECHAMENTO DO RIO PARANÁ  
FONTE: CEHPAR (1976)

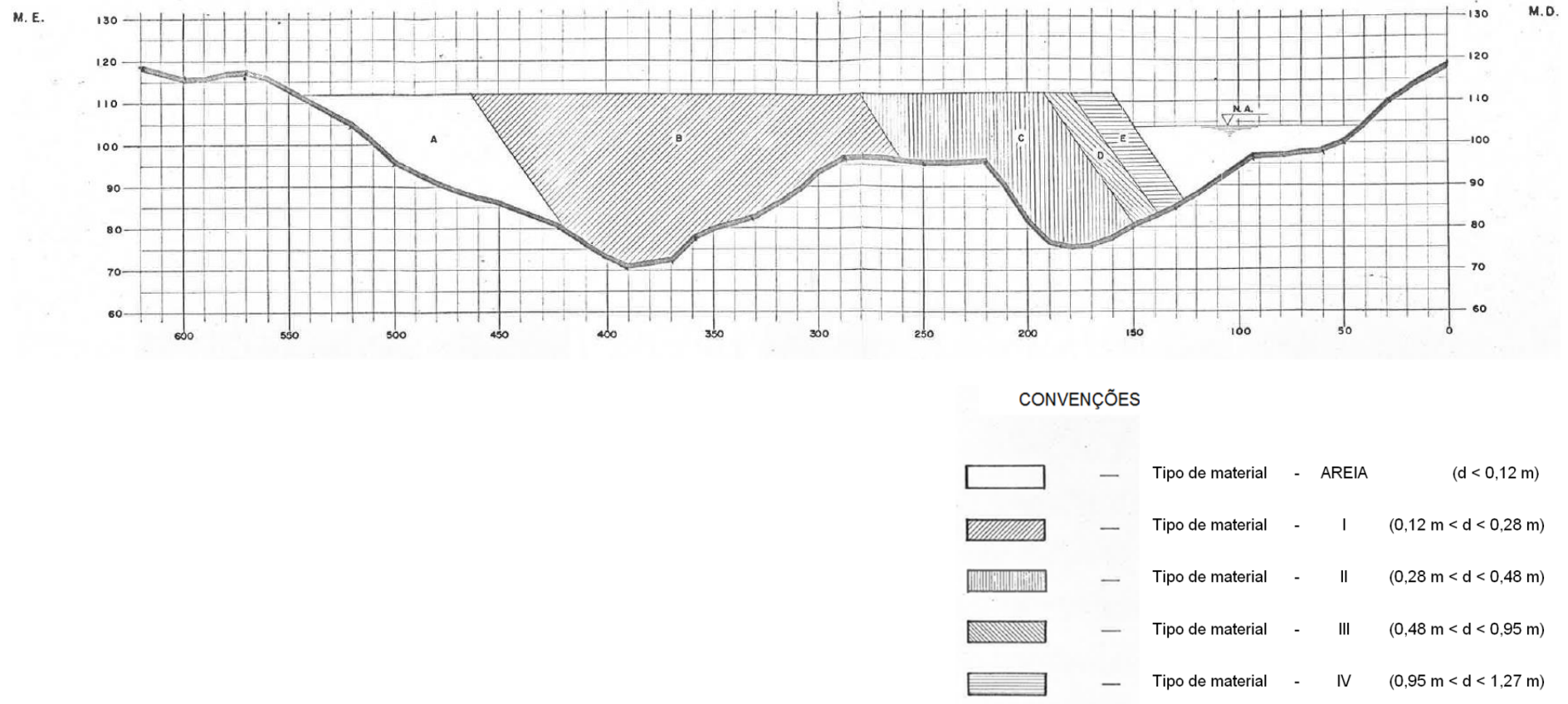


FIGURA 2.22 – SEÇÃO TRANSVERSAL PRÉ-ENSECADEIRA Nº 1 E MATERIAIS PARA O FECHAMENTO DO RIO PARANÁ NO EIXO 1  
 FONTE: CEHPAR (1976)

TABELA 2.1 – PRÉ-ENSECADEIRA 1 – ESTUDO DO FECHAMENTO DO RIO PARANÁ NO EIXO 1 - MARGEM ESQUERDA PARA MARGEM DIREITA  
 FONTE: CEHPAR (1976)

ETAPA	Q <sub>canal</sub> <sup>(1)</sup> (m <sup>3</sup> /s)	ESTACAS		NA <sub>seção</sub> <sup>(2)</sup>	MATERIAL	LARGURA DA BRECHA	VELOCIDADES				
		Crista	Solo				EST. <sup>(3)</sup>	SIT. <sup>(4)</sup>	POS. <sup>(5)</sup>	Alfa <sup>(6)</sup>	V(m/s) <sup>(7)</sup>
A	4350	463	421	102,30	AREIA	366	444	20 m JUSANTE	TALUDE	90°	2,41
							440	EIXO	TALUDE	90°	1,87
							425	EIXO	TALUDE	90°	1,60
B	6225	280	260	102,75	I	216	253	20 m JUSANTE	TALUDE	90°	4,47
							253	EIXO	TALUDE	75°	3,76
							260	15 m MONTANTE	TALUDE	45°	3,56
							270	20 m MONTANTE	TALUDE	60°	3,61
C	7150	192	150	103,15	II	141	175	20 m MONTANTE	TALUDE	60°	4,18
							170	EIXO	TALUDE	90°	5,82
							170	22 m JUSANTE	TALUDE	90°	6,35
							150	EIXO	TALUDE	90°	4,57
D	8100	180	139	103,45	III	131	163	15 m MONTANTE	TALUDE	60°	4,62
							160	EIXO	TALUDE	60°	6,18
							149	30 m JUSANTE	TALUDE	90°	6,52
							149	EIXO	TALUDE	90°	5,75
E	8850	160	126	103,70	IV	114	143	10 m MONTANTE	TALUDE	60°	5,76

TABELA 2.1 – PRÉ-ENSECADEIRA 1 – ESTUDO DO FECHAMENTO DO RIO PARANÁ NO EIXO 1 - MARGEM ESQUERDA PARA MARGEM DIREITA  
 FONTE: CEHPAR (1976) (continuação)

ETAPA	Q <sub>canal</sub> <sup>(1)</sup> (m <sup>3</sup> /s)	ESTACAS		NA <sub>seção</sub> <sup>(2)</sup>	MATERIAL	LARGURA DA BRECHA	VELOCIDADES				
		Crista	Solo				EST. <sup>(3)</sup>	SIT. <sup>(4)</sup>	POS. <sup>(5)</sup>	Alfa <sup>(6)</sup>	V(m/s) <sup>(7)</sup>
							140	EIXO	TALUDE	75°	6,23
							130	25 m JUSANTE	TALUDE	90°	7,29
							127	EIXO	TALUDE	90°	6,20
F	9100				850 cubos						

NOTAS:

- (1) Parcela da vazão total derivada pelo canal de desvio.
- (2) Cota da superfície livre (aproximada) na brecha, eixo da ensecadeira.
- (3) Posição do ponto de medida relativamente à secção longitudinal da ensecadeira.
- (4) Posição do ponto de medida relativamente à secção transversal da ensecadeira (MONTANTE e JUSANTE).
- (5) Posição do ponto de medida relativamente à profundidade (TALUDE SUPERIOR – junto ao talude, logo abaixo da superfície livre; TALUDE SAIA – junto ao talude, a meia profundidade; TALUDE SOLO – junto ao talude, vizinhança do leito do rio).
- (6) Ângulo formado pelo molinete com o eixo da ensecadeira.
- (7) Magnitude da velocidade no ponto.

### Fechamento Eixo 22

**- Características do Ensaio:**

Vazão:  $Q = 12.000 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Nível a jusante: NA. R3 = 102 m.

Tipo de fechamento: Eixo 22, conforme indicado na FIGURA 2.23. Avanço em ponta de aterro, simultaneamente a partir das duas margens.



FIGURA 2.23 – AVANÇO EM PONTA DE ATERRO SIMULTÂNEAMENTE A PARTIR DAS DUAS MARGENS PARA O ESTUDO DO FECHAMENTO DO RIO PARANÁ NO EIXO 22 PARA A CONSTRUÇÃO DA ITAIPU  
FONTE: CEHPAR (1976)

**- Sistemática do Ensaio:** O fechamento foi conduzido de forma análoga à adotada nos demais testes, efetuando-se a substituição dos materiais ao serem atingidos os limites de estabilidade. A deposição do material só foi efetuada com ritmo definido ao final de cada etapa (equivalente à  $1.000 \text{ m}^3$  por hora em cada frente em protótipo). O material artificial foi depositado com ritmo desde o início, efetuando-se o lançamento conjunto de 3 unidades a cada 6 segundos. Para esse tipo de material admitiu-se arrastamento, tentando evoluir com o fechamento até a sua conclusão, o que foi possível tanto com cubos quanto com tetraedros. Os materiais cubos e tetraedros são materiais pré-moldados com esses formatos.

- **Principais Observações:** Durante a etapa de deposição do material III ( $0,48 \text{ m} < d < 0,95 \text{ m}$  no protótipo), começou a se manifestar pronunciada corrente de retorno a jusante da ensecadeira, na margem direita, originando velocidades suficientemente altas para causar erosão no talude do trecho de ensecadeira já executado, faixa correspondente à deposição de Areia. Essa corrente se torna gradativamente mais intensa com o evoluir do fechamento, com consequentes acréscimos em sua capacidade erosiva (ver FIGURA 2.24 – situação ao final da deposição de material IV ( $0,95 \text{ m} < d < 1,27 \text{ m}$  no protótipo) e FIGURA 2.27 que possibilita uma visão geral da ensecadeira com destaque para a erosão causada no talude de jusante na margem direita).

Na deposição com CUBOS e TETRAEDROS (considerando a largura da crista reduzida a metade), houve possibilidade de progressão muito reduzida sem arrastamento de material. Sua presença, porém, não impediu a progressão do fechamento, pois os blocos arrastados da posição de lançamento se estabilizavam logo a jusante, a rigor ainda dentro da seção de ensecadeira se considerar sua largura total, passando a formar praticamente uma soleira de alta rugosidade, com absorção de parcela considerável de energia ao longo do seu desenvolvimento, conforme se observa na FIGURA 2.25.

Observa-se nas FIGURAS 2.25, 2.26 e 2.27 que a largura da crista dos cordões de fechamento foi reduzida na etapa final do fechamento do rio com o objetivo de acelerar a conclusão do fechamento.

Em mais um exemplo, com o objetivo de garantir o entendimento rápido e fácil dos ensaios em modelo reduzido, os resultados são apresentados de maneira resumida em forma de figuras e tabelas.

Uma vez que nesse exemplo o fechamento do rio foi realizado pelas duas margens, as informações detalhadas do lançamento de material a partir de cada margem (esquerda e direita) são organizadas e apresentadas na TABELA 2.2. A FIGURA 2.28 apresenta de maneira didática os materiais necessários para o fechamento do rio através de um corte pelo eixo da ensecadeira de enrocamento.

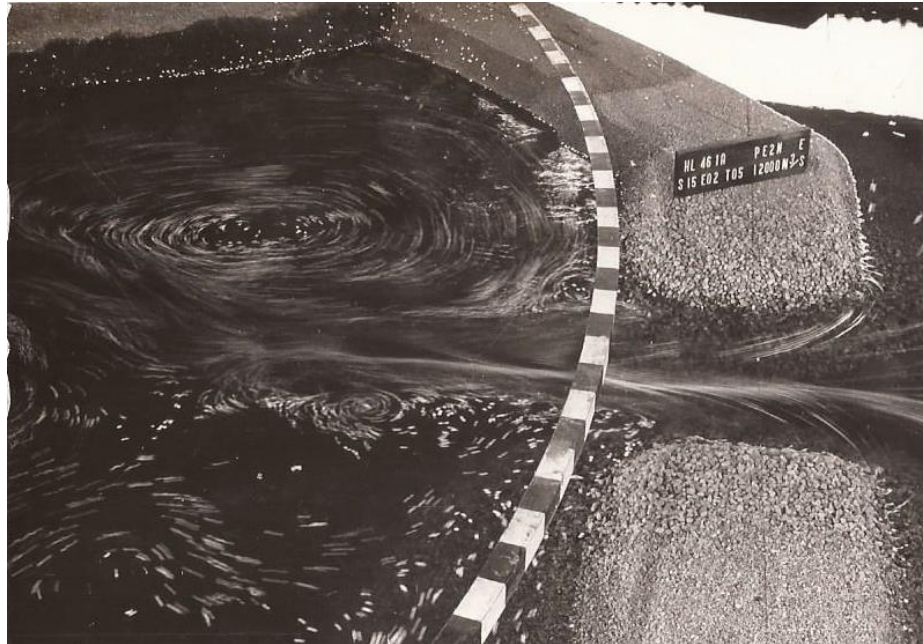


FIGURA 2.24 – LIMITE DE ESTABILIDADE DO MATERIAL IV NO ESTUDO DO FECHAMENTO DO RIO PARANÁ NO EIXO 22  
FONTE: CEHPAR (1976)

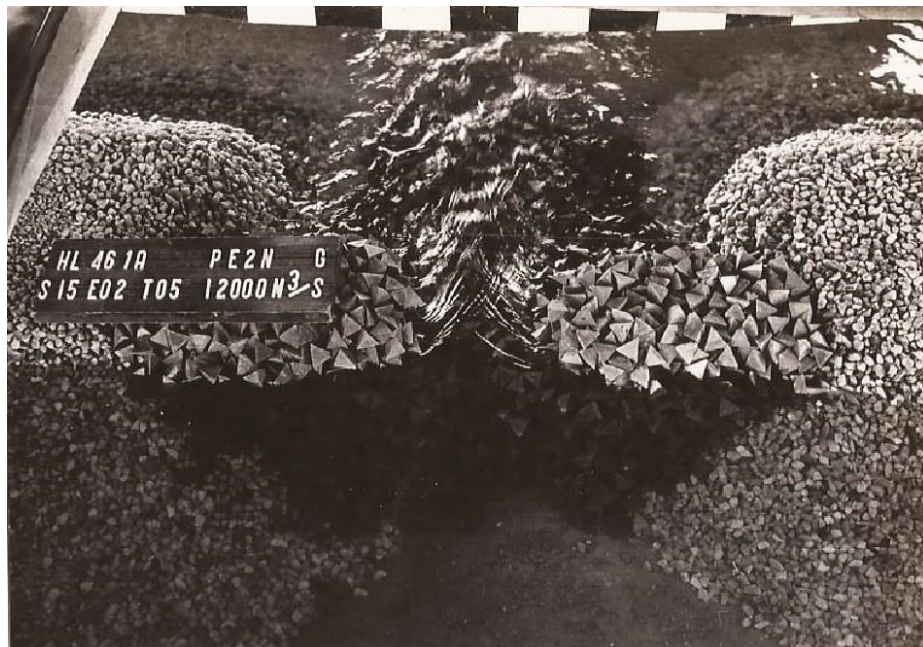


FIGURA 2.25 – ESTUDO DO FECHAMENTO DO RIO PARANÁ COM TETRAEDROS NO EIXO 22  
FONTE: CEHPAR (1976)

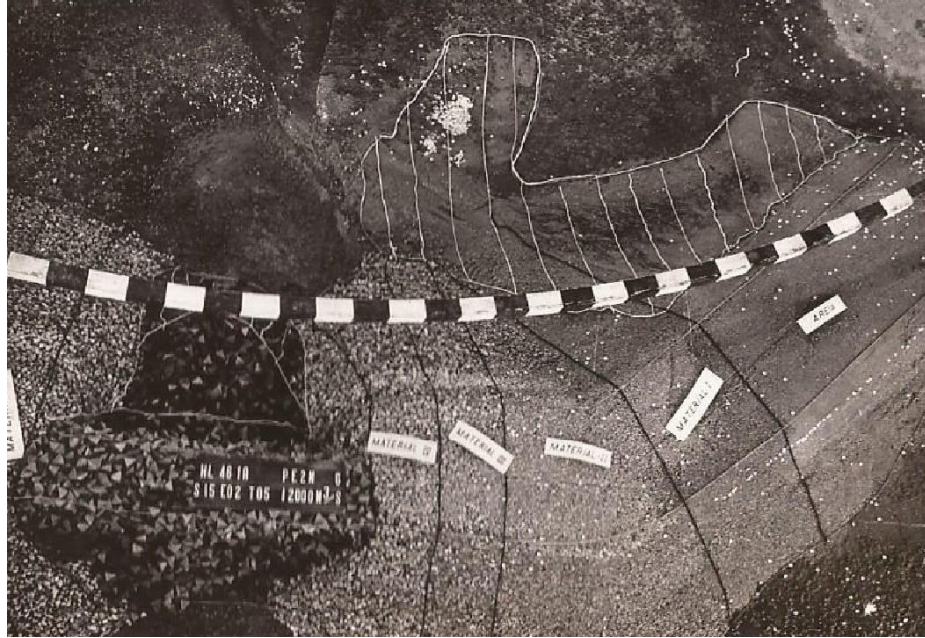
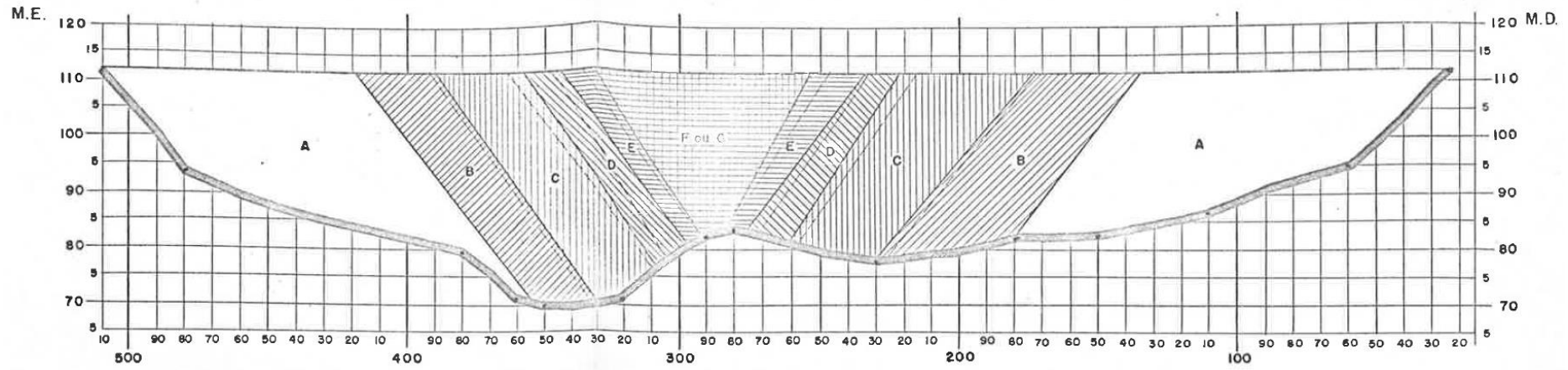


FIGURA 2.26 – ESTUDO DO FECHAMENTO DO RIO PARANÁ COM TETRAEDROS – SITUAÇÃO FINAL NO EIXO 22  
FONTE: CEHPAR (1976)



FIGURA 2.27 – ESTUDO DO FECHAMENTO DO RIO PARANÁ COM CUBOS – SITUAÇÃO FINAL NO EIXO 22  
FONTE: CEHPAR (1976)



CONVENÇÕES








		Tipo de material	-	AREIA
		Tipo de material	-	I
		Tipo de material	-	II
		Tipo de material	-	III
		Tipo de material	-	IV
		Tipo de material	-	CUBO
		Tipo de material	-	TETRAEDRO

FIGURA 2.28 – CONFIGURAÇÃO RESULTANTE DO ESTUDO DO FECHAMENTO DO RIO PARANÁ NO EIXO 22 - CORTE  
 FONTE: CEHPAR (1976)

TABELA 2.2 – PRÉ-ENSECADEIRA 22 – ESTUDO DO FECHAMENTO DO RIO PARANÁ - AVANÇO SIMULTANEAMENTE A PARTIR DAS DUAS MARGENS  
 FONTE: CEHPAR (1976)

ETAPA	Q <sub>canal</sub> <sup>(1)</sup> (m <sup>3</sup> /s)	LARGURA DA BRECHA	N <sub>aqueio</sub> <sup>(2)</sup>	MARGEM ESQUERDA				MARGEM DIREITA										
				ESTACAS		MATERIAL	VELOCIDADE		VELOCIDADE		Solo	VELOCIDADE						
				Crista	Solo		EST. (3)	SIT. (4)	POS. (5)	Alfa (6)		V(m/s) <sup>(7)</sup>	EST. (3)	SIT. (4)	POS. (5)	Alfa (6)	V(m/s) <sup>(7)</sup>	
A	3950	262	102,30	419	356	AREIA	397	EIXO	TALUDE SUPERIOR	90°	1,22	135	180	155	EIXO	TALUDE SUPERIOR	45° DIREITA	1,09
							356	EIXO	TALUDE SOLO	90°	0,99			180	EIXO	TALUDE SOLO	45° DIREITA	1,17
B	4500	184	102,45	390	330	I	390	20 m JUSANTE	TALUDE SAIA	75° ESQUERDA	1,20			150	15 m JUSANTE	TALUDE SAIA	45° DIREITA	1,09
				390	330		370	20 m MONTANTE	TALUDE SUPERIOR	75° ESQUERDA	3,52	174	230	190	15 m MONTANTE	TALUDE SUPERIOR	45° DIREITA	3,28
							360	EIXO	TALUDE SAIA	75° ESQUERDA	2,75			205	EIXO	TALUDE SUPERIOR	45° DIREITA	3,21
							330	EIXO	TALUDE SOLO	90°	3,18			230	EIXO	TALUDE SOLO	75° DIREITA	2,47
							350	12 m JUSANTE	TALUDE SAIA	75° ESQUERDA	3,18			218	15 m JUSANTE	TALUDE SAIA	60° DIREITA	3,23
C	6100	108	102,80	358	309	II	340	25 m MONTANTE	TALUDE SUPERIOR	45° ESQUERDA	2,77	222	261	240	20 m MONTANTE	TALUDE SUPERIOR	75° DIREITA	3,18
							325	EIXO	TALUDE SAIA	75° ESQUERDA	5,10			230	40 m MONTANTE	TALUDE SUPERIOR	45° DIREITA	4,09
							310	EIXO	TALUDE SOLO	90°	4,82			250	EIXO	TALUDE SAIA	90°	3,64
							320	15 m JUSANTE	TALUDE SAIA	75° ESQUERDA	5,30			240	EIXO	TALUDE SUPERIOR	90°	0,00
							335	EIXO	TALUDE SUPERIOR	90°	0,00			261	EIXO	TALUDE SOLO	90°	5,01
														261	15 m JUSANTE	TALUDE SOLO	90°	4,39
D	7150	80	103,30	344	297	III	330	25 m MONTANTE	TALUDE SUPERIOR	45° ESQUERDA	4,62	234	276	260	20 m MONTANTE	TALUDE SUPERIOR	45° DIREITA	5,20
							320	25 m MONTANTE	TALUDE SAIA	60° ESQUERDA	4,58			270	EIXO	TALUDE SAIA	75° DIREITA	6,27
							320	EIXO	TALUDE SAIA	75° ESQUERDA	6,40			276	EIXO	TALUDE SOLO	90°	5,57
							297	EIXO	TALUDE SOLO	75° ESQUERDA	6,23			276	10 m JUSANTE	TALUDE SOLO	90°	5,07
E	8800	55	104,0	332	292	IV	317	20 m MONTANTE	TALUDE SUPERIOR	60° ESQUERDA	4,7	253	283	265	20 m MONTANTE	TALUDE SUPERIOR	60° DIREITA	4,95
							300	EIXO	TALUDE SAIA	75° ESQUERDA	6,44			280	EIXO	TALUDE SAIA	75° DIREITA	6,56
							292	EIXO	TALUDE SOLO	90°	6,31			285	EIXO	TALUDE SOLO	90°	7,02
							290	15 m JUSANTE	TALUDE SOLO	90°	7,70			287	15 m JUSANTE	TALUDE SOLO	90°	8,00
F	10950	0				CUBO												
E	11050	0				TETRAEDRO												
												3030 CUBOS						
												2940 TETRAEDROS						

NOTAS: Conforme apresentadas na TABELA 2.1.

## 2.5 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS EM MODELOS REDUZIDOS E EM PROTÓTIPOS

A FIGURA 2.29 apresenta, para os métodos de Isbash, Bouvard e Shields, a correlação entre o diâmetro de esfera equivalente do material, o peso dos blocos e a velocidade crítica, que é a velocidade que conduz a instabilidade do material. São apresentadas também na mesma figura, as condições de estabilidade de um cubo isolado resultados de protótipo de Passamaquody (Estados Unidos), do modelo da barragem da Rance (França), do modelo da Barragem de Bonneville (Estados Unidos), de modelos de diversas obras estudadas no laboratório de hidráulica CEHPAR, do protótipo de Foz do Areia e de outros protótipos.

É possível identificar que os materiais empregados nos fechamentos em protótipo contemplados nesta figura seguiram, de maneira geral, critérios de dimensionamento altamente conservadores. Fica evidente também a tendência de afastamento das retas que representam os métodos de Isbash, Shields e Bouvard dos resultados dos estudos em modelo hidráulico reduzido à medida que os diâmetros diminuem. Esta constatação indica, para um mesmo diâmetro, o material resiste a uma maior velocidade crítica no modelo reduzido se comparado com a tendência esperada no protótipo, indicada nesta análise pelos métodos teóricos de Isbash, Bouvard e Shields. Assim, de maneira geral, constata-se que os resultados dos estudos em modelo hidráulico reduzido tendem a subdimensionar o material a ser empregado no fechamento em protótipo quanto menor a dimensão do material, ou seja, para resistir à uma mesma velocidade, os resultados em modelo reduzido indicam material com diâmetro menor do que os métodos teóricos consagrados (PEREIRA, 2001).

De maneira recorrente costuma-se atribuir esse desvio a efeitos de escala em função da ação viscosa junto ao leito nos materiais de menor diâmetro no modelo reduzido. Entretanto, Pereira (2001) comenta uma conclusão decisiva com relação a esse efeito: de que a alteração da ação viscosa sobre a tensão tangencial crítica nos menores diâmetros tende a fazer com que o menor diâmetro se encontre em condições menos estáveis e não o oposto. Assim, o fato do material de menor diâmetro, no modelo reduzido, resistir a maiores velocidades do que no protótipo não pode ser explicada pelo efeito da ação viscosa sobre a tensão tangencial crítica, pois seu efeito é justamente o contrário.

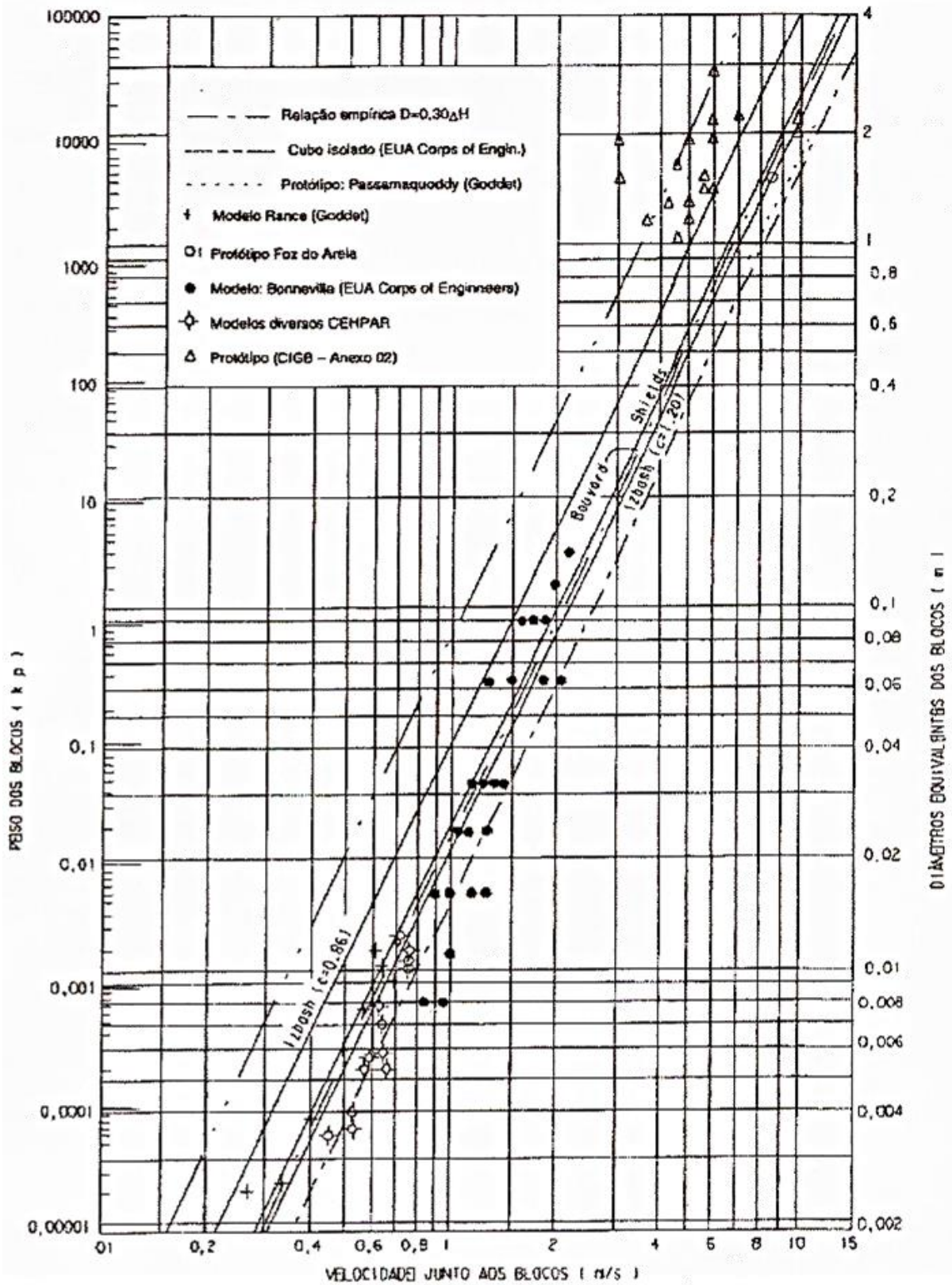


FIGURA 2.29 – RELAÇÃO VELOCIDADE DO ESCOAMENTO VERSUS PESO E DIÂMETRO DOS BLOCOS

FONTE: NEIDERT E TOZZI (1986)

Pereira (2001) constata também, a partir de seus estudos experimentais, a importância da configuração da ponta de aterro e recomenda investigação do campo de velocidades e da distribuição das tensões tangenciais sobre o maciço curvo considerando diferentes configurações de ponta de aterro, principalmente quanto ao talude do maciço.

## 2.6 ÂNGULO DE REPOUSO DOS MATERIAIS

Lane (1953<sup>vii</sup>, citado por GRAF, 1970) propôs o diagrama apresentado na FIGURA 2.30 que indica o ângulo de repouso ( $\phi$ ) de materiais com densidade relativa ( $S_s$ ) igual a 2,65 e diâmetro maior que 5 mm.

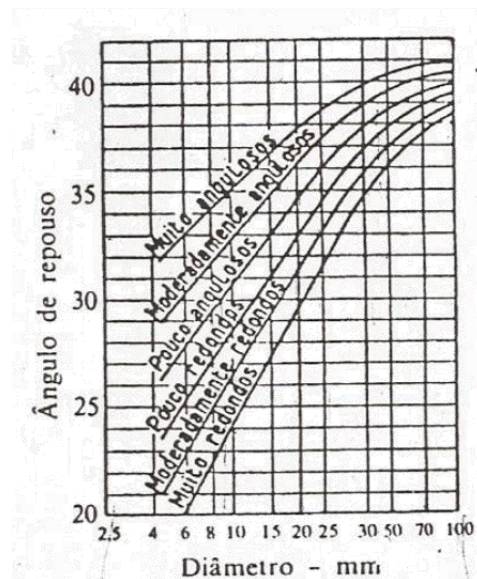


FIGURA 2.30 – ÂNGULO DE REPOUSO DE MATERIAL NÃO COESIVO  
 FONTE: Tradução livre de LANE (1953, citado por GRAF, 1970)

De maneira prática, o ângulo de repouso do material determina o ângulo de inclinação do talude da enseadeira construída com aquele material conforme representado na FIGURA 2.31.

<sup>vii</sup> LANE, E. W. **Progress Report on Studies on the Design of Stable Channels of the Bureau of Reclamation**. Vol 79. 1953.

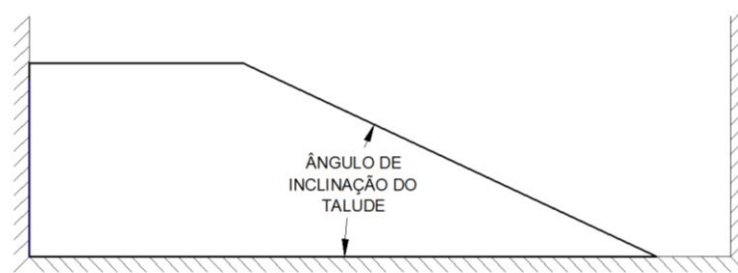


FIGURA 2.31 – ÂNGULO DE INCLINAÇÃO DO TALUDE DE UMA ENSECADEIRA

Considerando um escoamento com as mesmas condições de vazão e altura da ensecadeira e diferentes configurações de inclinação do talude da ensecadeira, a partir dos conhecimentos de Lane (1953, citado por GRAF, 1970) explicitados pela FIGURA 2.30, pode-se depreender a TABELA 2.3.

A TABELA 2.3 apresenta a relação teórica entre o ângulo de repouso ou inclinação do talude da ponta de aterro e a velocidade na região da ponta de aterro. Para isso indica, na quarta coluna, o aumento da velocidade para diversos diâmetros de material em comparação com a velocidade para material com diâmetro de 5 mm. Como primeiro valor para esta análise, adotou-se o material com diâmetro de 5 mm pois é essa a ordem de grandeza do diâmetro em que iniciam-se as linhas do gráfico apresentado na FIGURA 2.30.

As relações apresentadas na TABELA 2.3 evidenciam a conclusão teórica de que a alteração da inclinação do talude da ensecadeira na região da ponta de aterro afeta a velocidade nessa região. Além disso, demonstra que, quanto maior o ângulo do talude da ponta de aterro, ou seja, talude mais íngreme, maior a velocidade naquela região em comparação com velocidades em pontas de aterro com talude mais abatido.


TABELA 2.3 – RELAÇÃO TEÓRICA ENTRE O ÂNGULO DE REPOUSO/INCLINAÇÃO DO TALUDE E VELOCIDADE NA REGIÃO DA PONTA DE ATERRO DA ENSECADEIRA

$d$ (mm) <sup>(1)</sup>	$\Phi$ (graus) <sup>(2)</sup>	$H/R = \text{tg } \Phi$ <sup>(3)</sup>	$V/V_{d=5\text{mm}}$ <sup>(4)</sup>
5	26,8	0,51	1,00
6	28,0	0,53	1,05
8	29,5	0,57	1,12
10	30,7	0,59	1,18
15	33,0	0,65	1,29
20	34,8	0,70	1,38
25	36,0	0,73	1,44

$d$ (mm) <sup>(1)</sup>	$\Phi$ (graus) <sup>(2)</sup>	$H/R = \text{tg } \Phi$ <sup>(3)</sup>	$V/V_{d=5\text{mm}}$ <sup>(4)</sup>
30	38,0	0,78	1,55
50	38,7	0,80	1,59
70	39,5	0,82	1,63
100	40,0	0,84	1,66

## NOTAS:

- (1) Diâmetro do material. Dado obtido da FIGURA 2.30 para material pouco anguloso.  
 (2) Ângulo de repouso/inclinação do talude. Dado obtido da FIGURA 2.30 para material pouco anguloso.

- (3)   
 H – altura da ensecadeira  
 R – parâmetro geométrico resultante em função da inclinação do talude da ensecadeira

- (4) V – velocidade na região da ponta de aterro da ensecadeira.  
 $V_{d=5\text{mm}}$  – velocidade na região da ponta de aterro da ensecadeira com material de 5 mm (com inclinação do talude igual a 26,8 graus).

## 2.7 DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL

O comportamento dos fluidos pode ser descrito por equações diferenciais que usualmente não podem ser resolvidas analiticamente. Com o desenvolvimento da tecnologia da computação, o interesse nos modelos numéricos aumentou e a solução das equações da mecânica dos fluidos em computadores se tornou cada vez mais importante.

Este campo de estudos é conhecido por dinâmica dos fluidos computacional, em inglês CFD “Computational Fluid Dynamics”, utiliza métodos para aproximar as equações diferenciais para um sistema de equações algébricas que podem então ser resolvidas de forma computacional, para obter uma solução numérica aproximada.

Ferziger e Peric (2002) enfatizam que os resultados numéricos serão sempre uma aproximação, isso porque, para produzir as soluções numéricas, são assumidos erros, aproximações e simplificações durante o processo.

Portanto, a modelagem numérica é complementar aos estudos em modelo físico. Isso significa que havendo modelo físico planejado para um estudo ou projeto, o modelo numérico poderá ser executado antes dos estudos no modelo físico com o

objetivo de auxiliar a definição do que se quer estudar no modelo físico, eliminando antecipadamente dúvidas e reduzindo alternativas.

Não havendo disponibilidade de cronograma e/ou orçamento para os estudos em modelo físico, o modelo numérico possivelmente será a única alternativa de aprofundar conhecimento e sanar dúvidas do projeto. Nestes casos é muito importante a existência de modelos físicos ou registros em protótipo de situações semelhantes de outros projetos para calibrar o modelo e deixá-lo apto para o assunto que se pretende estudar.

### 2.7.1 Equações Governantes dos Fluidos

A experiência mostra que as equações de Navier-Stokes descrevem o comportamento do fluido de forma adequada (FERZIGER E PERIC, 2002). Estas equações mais a equação da continuidade formam um conjunto de quatro equações para quatro incógnitas: "u", "v", "w" e "p". Sendo "u", "v", "w", componentes da velocidade, e "p", pressões.

A seguir são apresentadas a equação da continuidade, Equação 2.22, e as Equações 2.23, 2.24 e 2.25 de Navier-Stokes, considerando escoamento incompressível com viscosidade constante (BIRD; STEWART; LIGHTFOOT, 2002).

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.22)$$

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (2.23)$$

$$\rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (2.24)$$

$$\rho \left( \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = \rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (2.25)$$

As equações de Navier-Stokes representam o equilíbrio entre o transporte da quantidade de movimento e as forças gravitacionais, de pressão e viscosa, conforme segue representado no esquema das equações de Navier-Stokes em notação vetorial, Equação 2.26 (USP, 2014).

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = \rho \vec{g} - \nabla p + \mu \nabla^2 \vec{V} \quad (2.26)$$

Massa por unidade de volume vezes aceleração (transporte de quantidade de movimento)	Força gravitacional por unidade de volume (força de campo)	Força de pressão por unidade de volume (força de superfície)	Força viscosa por unidade de volume (termo de difusão de quantidade de movimento)
--	--	--	---

A grande maioria dos escoamentos na prática da engenharia e na natureza são turbulentos. Apesar disso, a turbulência não é de fácil definição. O escoamento turbulento é definido pelas equações de Navier-Stokes, entretanto, é impossível prever em detalhe o comportamento desse tipo de escoamento. Isso porque existem muitas escalas a serem resolvidas (KUNDU e COHEN, 2008).

Segundo Fill (2011), com o objetivo de atender completamente as equações de Navier-Stokes, de maneira teórica seria necessário resolvê-las até as escalas onde as tensões viscosas têm significado físico, ou seja, dentro de escalas capazes de resolver os vórtices onde a dissipação viscosa ocorre. Isso significa, em modelo numérico, utilizar discretizações espaciais e temporais compatíveis. Até mesmo o computador mais poderoso dos dias atuais levaria um tempo absurdo para prever esses detalhes de um escoamento turbulento, resolvendo até as menores escalas envolvidas (KUNDU e COHEN, 2008).

O escoamento turbulento pode ser caracterizado como irregular, desorganizado, caótico, não repetitivo, não linear e com grande variação da vorticidade (KUNDU e COHEN, 2008; MCDONOUGH, 2007).

Osborne Reynolds, em 1883, foi o primeiro a estudar sistematicamente a turbulência. Seus estudos mostraram que o escoamento se torna turbulento quando a relação  $Re = UL/\nu$  (onde  $U$  é a escala de velocidade,  $L$  é a escala de comprimento e  $\nu$  é a viscosidade cinemática), mais tarde chamada de número de Reynolds, supera um valor crítico (KUNDU e COHEN, 2008). Os estudos de Reynolds estão entre os mais importantes resultados já produzidos sobre turbulência. Em particular, Reynolds conclui que a turbulência é bastante complicada para permitir um entendimento detalhado. Em resposta a isso, introduziu a decomposição do escoamento em termos de quantidades médias de pressão e de velocidade, a chamada Decomposição de Reynolds.

### 2.7.1.1 Decomposição de Reynolds

A Decomposição de Reynolds consiste em considerar que a velocidade e pressão instantâneas podem ser decompostas em um valor médio e um valor que corresponde à flutuação turbulenta.

$$u(t) = u + u' \quad (2.27)$$

$$v(t) = v + v' \quad (2.28)$$

$$w(t) = w + w' \quad (2.29)$$

$$p(t) = p + p' \quad (2.30)$$

Onde  $u, v, w$  são as componentes da velocidade e  $p$  das pressões.

Inserindo essas equações na equação da continuidade e, na sequência, nas equações de Navier-Stokes, através de manipulações algébricas é possível obter as chamadas equações de Navier-Stokes com média de Reynolds, em inglês “RANS – Reynolds Averaged Navier-Stokes”, apresentadas a seguir Equações 2.31, 2.32 e 2.33.

$$\frac{\partial U}{\partial t} + u \frac{\partial U}{\partial x} + v \frac{\partial U}{\partial y} + w \frac{\partial U}{\partial z} = g_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left( \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \right) - \left( \overline{\frac{\partial u'^2}{\partial x}} + \overline{\frac{\partial u'v'}{\partial y}} + \overline{\frac{\partial u'w'}{\partial z}} \right) \quad (2.31)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + u \frac{\partial V}{\partial x} + v \frac{\partial V}{\partial y} + w \frac{\partial V}{\partial z} = g_y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left( \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} \right) - \left( \overline{\frac{\partial v'u'}{\partial x}} + \overline{\frac{\partial v'^2}{\partial y}} + \overline{\frac{\partial v'w'}{\partial z}} \right) \quad (2.32)$$

$$\frac{\partial W}{\partial t} + u \frac{\partial W}{\partial x} + v \frac{\partial W}{\partial y} + w \frac{\partial W}{\partial z} = g_z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left( \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial z^2} \right) - \left( \overline{\frac{\partial w'u'}{\partial x}} + \overline{\frac{\partial w'v'}{\partial y}} + \overline{\frac{\partial w'^2}{\partial z}} \right) \quad (2.33)$$

As equações RANS são semelhantes às equações de Navier-Stokes. Uma diferença é que as variáveis dependentes nas equações RANS são as velocidades médias e a pressão média ao invés das instantâneas das Equações 2.22 a 2.25. A outra diferença é o aparecimento de novos termos que representam a influência das flutuações turbulentas no escoamento (representado pelos termos que constam no último parênteses nas Equações 2.31 a 2.33).

Uma vez que não há nenhuma equação adicional ao sistema, existem mais variáveis do que equações, gerando o chamado problema de fechamento

matemático da turbulência. Para solucionar este problema, as equações adicionais são fornecidas pelos chamados modelos de turbulência.

### 2.7.1.2 Modelos de Turbulência

Existem diferentes modelos de turbulência, cada qual com seu nível de aproximação, conforme descreve Davidson (2003). A maior parte dos modelos de turbulência são baseados no conceito introduzido por Boussinesq em 1877. Boussinesq propôs uma analogia entre as tensões turbulentas e as tensões viscosas do escoamento laminar, onde se assume que as tensões turbulentas são proporcionais ao gradiente de velocidade média do escoamento, e o coeficiente de proporcionalidade é chamado de “viscosidade turbulenta” (REZENDE, 2009)

Prandtl, em 1925, propôs a teoria do comprimento de mistura. Alega-se que Kolmogorov, em 1942, já introduzia ideias do modelo  $k - \varepsilon$ . Entretanto é creditado a Jones e Launder (1972) o desenvolvimento do modelo  $k - \varepsilon$  e a Launder e Sharma (1974) o seu aperfeiçoamento (MCDONOUGH, 2007).

O modelo  $k - \varepsilon$  é um modelo de duas equações que simula a viscosidade turbulenta através de duas equações diferenciais parciais, uma para a energia cinética turbulenta,  $k$ , e outra para a taxa de dissipação da energia cinética turbulenta,  $\varepsilon$ . Dessa forma, esse modelo de turbulência pode ser visto como completo, pois, diferentemente dos modelos de zero e uma equações, possui equações suficientes para compor a viscosidade turbulenta sem necessitar de algum apelo direto à resultados experimentais. Versteeg e Malalasekera (1995) comentam que o modelo de turbulência  $k - \varepsilon$  é, sem dúvidas, o mais utilizado e validado.

Mais recentemente o chamado modelo  $k - \varepsilon$  RNG foi desenvolvido baseado na teoria de renormalização de grupos (YAKHOT e ORSZAG<sup>viii</sup>, 1986; YAKHOT e SMITH<sup>ix</sup>, 1992, citado por FLOW 3D® v10.0 User Manual, 2011). Esse modelo apresenta as mesmas equações para a energia cinética turbulenta e para a taxa de dissipação turbulenta do modelo  $k - \varepsilon$ , entretanto, as constantes que são encontradas de forma empírica no modelo  $k - \varepsilon$ , são derivadas explicitamente no modelo RNG. De forma geral, o modelo RNG tem aplicação mais ampla do que o

<sup>viii</sup> Yakhot, V.; Orszag, S. A. **Renormalization group analysis of turbulence**. December 1986.

<sup>ix</sup> Yakhot, V.; Smith, L. M. **The renormalization group, the e-expansion and derivation of turbulence models**. March 1992.

modelo padrão  $k - \varepsilon$ . Especificamente, o modelo  $k - \varepsilon$  RNG é conhecido por descrever escoamentos turbulentos de baixa intensidade e regiões com forte tensão com maior precisão.

A revisão de literatura realizada permite perceber as diversas abordagens de estudo teórico do problema em questão, o problema de fechamento de rio. O fato é que é grande a quantidade de parâmetros e variáveis envolvidas na definição dos projetos de engenharia para o fechamento de rios.

Esta situação leva a necessidade, cada vez mais, do melhor entendimento do processo do fechamento de rio através do método lateral progressivo, ou em ponta de aterro, método este mais utilizado no Brasil.

Estudos sobre o escoamento neste tipo de fechamento do rio, bem como estudos relacionados à geometria da enseada devem auxiliar o melhor entendimento do escoamento na ponta de aterro durante o fechamento do rio em ponta de aterro. A melhor compreensão do comportamento do escoamento permitirá ao projetista e ao empreiteiro maior domínio do processo de fechamento do rio para a solução de problemas práticos de engenharia.

Há necessidade também de um maior conhecimento e validação de ferramentas computacionais que facilitem e auxiliem os estudos de fechamento de rio.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para atingir os objetivos propostos nesta pesquisa, os estudos foram divididos em duas etapas: Etapa 1 - estudo de caso utilizando o modelo numérico escolhido, o FLOW 3D<sup>®</sup>, com o objetivo de reproduzir um estudo realizado em modelo físico e validar o modelo numérico escolhido para os estudos da segunda etapa; e Etapa 2 - estudos relacionados à variação das características do cordão de enrocamento: a) largura da crista (e raio da ponta de aterro) e b) inclinação do talude com o objetivo de avaliar se a curvatura do escoamento afeta as condições do escoamento na região da ponta de aterro e se essa hipótese for verdadeira, estudar como afeta.

O fluxograma apresentado a seguir, FIGURAS 3.1 e 3.2, resume a sequência dos procedimentos metodológicos utilizados para o desenvolvimento deste trabalho.

FIGURA 3.1 – FLUXOGRAMA DA ETAPA 1 DE ESTUDOS

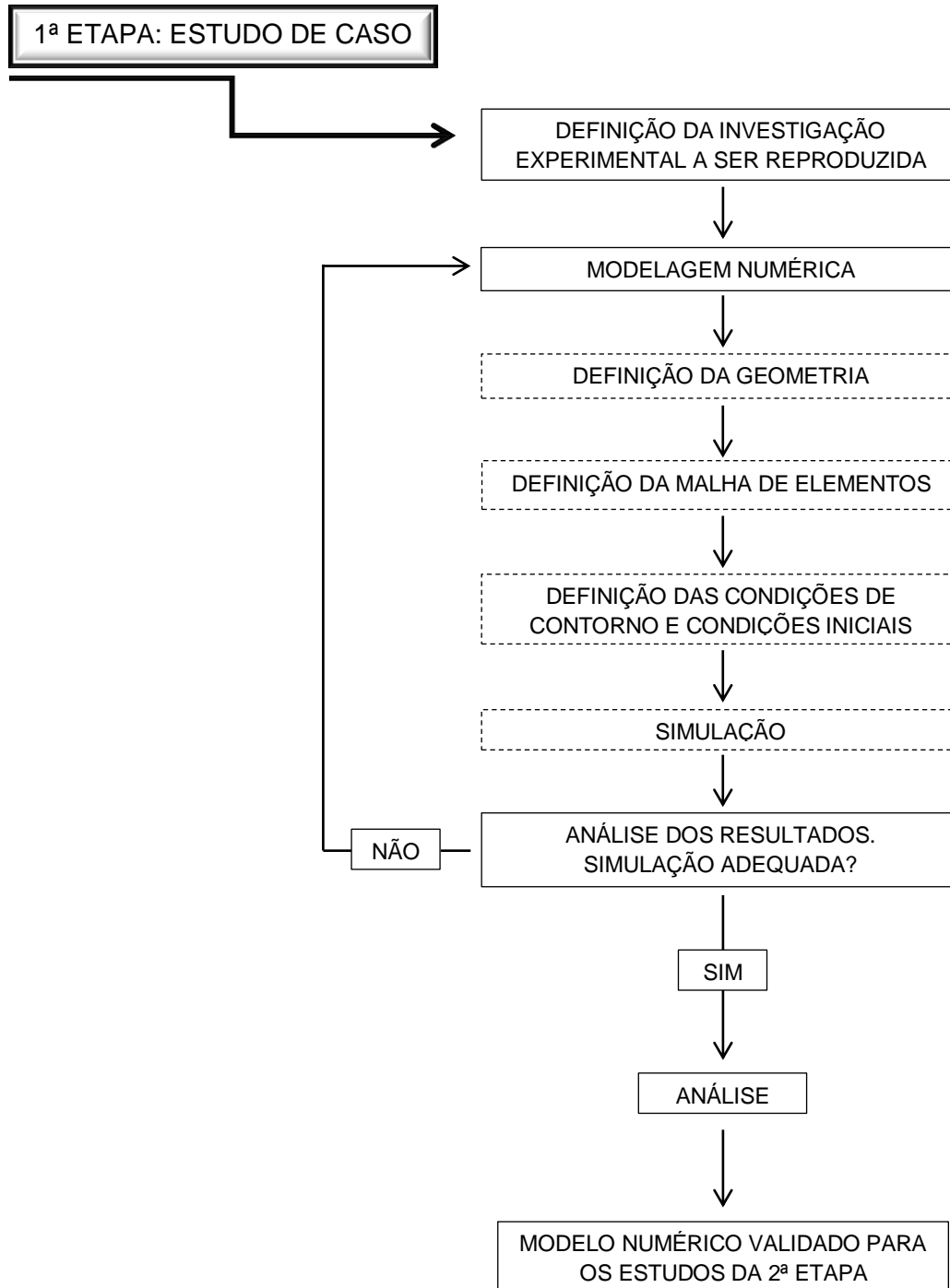
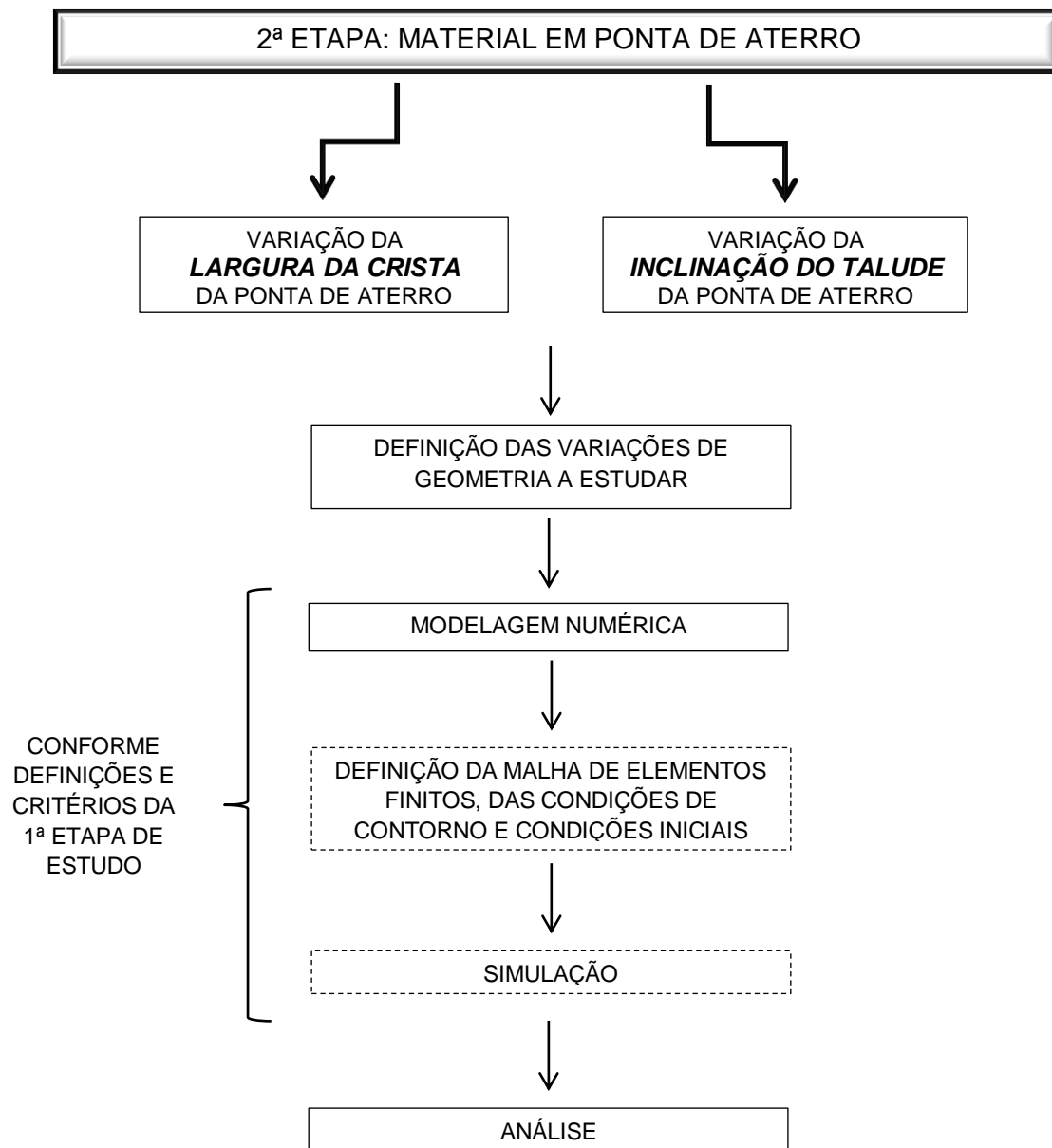


FIGURA 3.2 – FLUXOGRAMA DA ETAPA 2 DE ESTUDOS



### 3.1 ESTUDO DE CASO

Nesta primeira etapa foi realizada a verificação se o modelo numérico, o software FLOW 3D®, é capaz de reproduzir os resultados obtidos em ensaios em modelo físico realizados por PEREIRA (2001). A análise comparativa foi realizada de forma quantitativa através das medidas de velocidades. Esses estudos foram realizados para validar a utilização do modelo numérico para os estudos subsequentes.

### 3.1.1 Investigação Experimental

A investigação experimental realizada por PEREIRA (2001) compreende três ensaios realizados em modelo hidráulico reduzido. Nesta etapa do trabalho, o objetivo foi reproduzir em modelo numérico um destes ensaios, o realizado em um canal com as seguintes características:

- Largura:  $B = 2,40$  m
- Comprimento de escoamento livre: 14,47 m
- Profundidade a montante:  $h = 0,60$  m
- Vazão:  $Q = 230,974$  l/s =  $0,230974$  m<sup>3</sup>/s
- Material da ensecadeira:  $D_{50} = 7,42$  mm =  $0,00742$  m
- Velocidade média de aproximação:  $U = 0,16$  m/s

A partir de estudos com material de fechamento, antes do limite de estabilidade, Pereira (2001) obteve a geometria para a confecção de uma ensecadeira fixa e maciça conforme é demonstrado nas FIGURAS 3.3, 3.4 e 3.5.

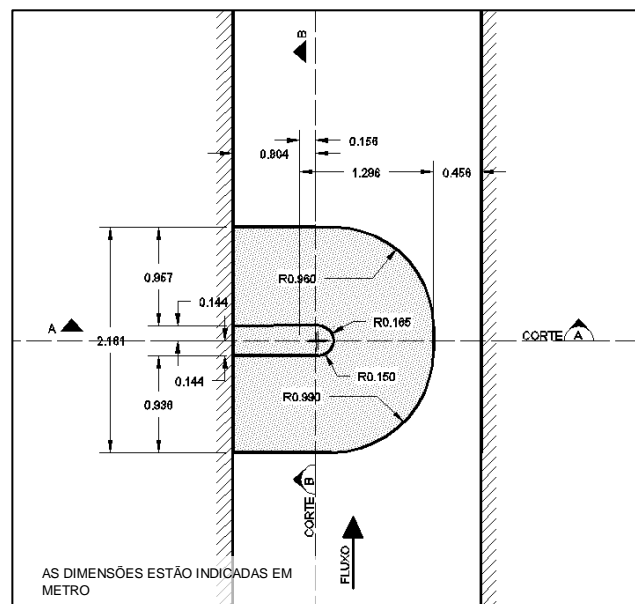


FIGURA 3.3 – PLANTA E DIMENSÕES DA ENSECADREIRA - INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL (PEREIRA, 2001)

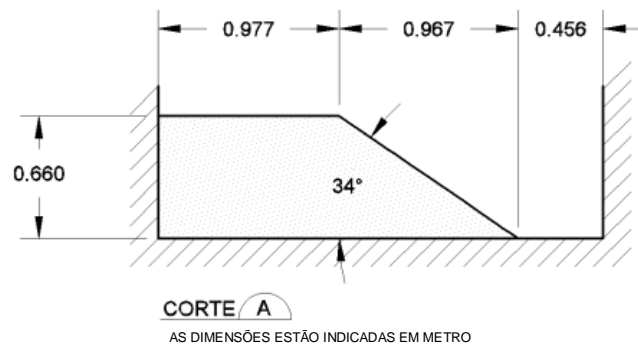


FIGURA 3.4 – CORTE “A” E DIMENSÕES DA ENSECADDEIRA - INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL (PEREIRA, 2001)

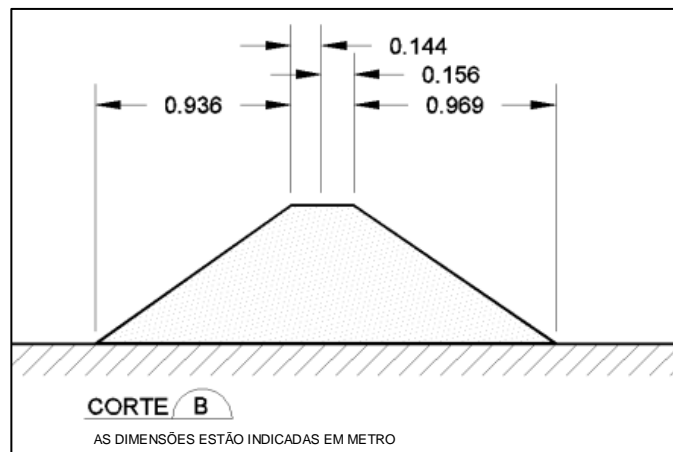


FIGURA 3.5 – CORTE “B” E DIMENSÕES DA ENSECADDEIRA - INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL (PEREIRA, 2001)

As velocidades no contorno da ensecadeira foram registradas, no modelo físico reduzido, em três alinhamentos:  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  e  $90^\circ$  e em três profundidades “A”, “B” e “C” conforme FIGURA 3.6 e FIGURA 3.7. A profundidade “A” representa o fundo do canal, a profundidade “B” representa 32,49 cm acima do fundo do canal, e a profundidade “C” está 32,49 cm acima de B conforme segue representado na FIGURA 3.7.

No modelo físico, os pontos de registro de velocidade foram definidos perpendicularmente à inclinação do talude da ensecadeira conforme disposição em planta e corte indicada nas FIGURAS 3.6 e 3.7, respectivamente. As distâncias dos pontos de registro de velocidade até o talude da ensecadeira estão indicadas na TABELA 3.1, e a FIGURA 3.9 indica de maneira esquemática os referidos pontos na seção do eixo da ensecadeira ( $90^\circ$ ). No modelo numérico, os registros de velocidade

foram feitos exatamente nos mesmos pontos, e estão representados na FIGURA 3.8.

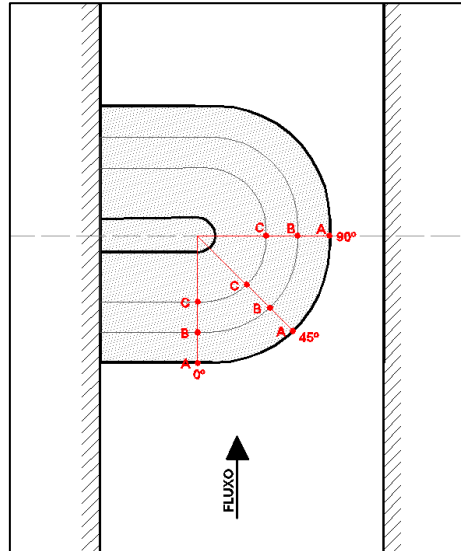


FIGURA 3.6 – ENSECADEIRA DA INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL (PEREIRA, 2001) – PONTOS DE REGISTRO DE VELOCIDADE NO ENTORNO DA PONTA DE ATERRO – PLANTA

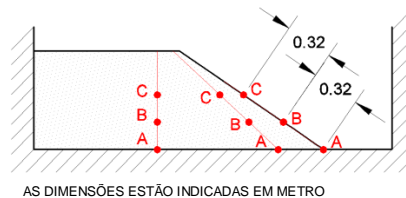


FIGURA 3.7 – ENSECADEIRA INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL (PEREIRA, 2001) – PONTOS DE REGISTRO DE VELOCIDADE NO ENTORNO DA PONTA DE ATERRO - CORTE

TABELA 3.1 – AFASTAMENTO DOS PONTOS DE REGISTRO DE VELOCIDADE COM RELAÇÃO AO TALUDE DA ENSECADEIRA

Ponto	Distância do Talude (m)
1	0,006
2	0,03
3	0,06
4	0,09
5	0,12
6	0,18
7	0,24
8	0,30
9	0,45
10	0,60

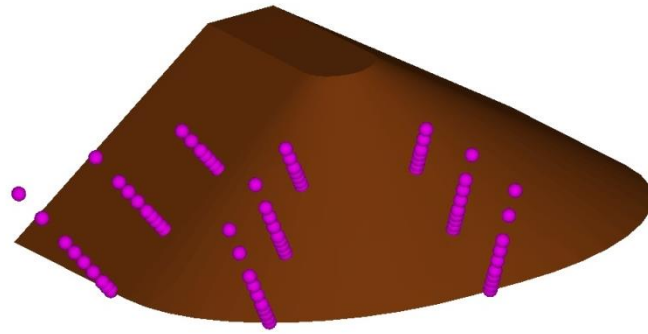


FIGURA 3.8 – PONTOS DE REGISTRO DE VELOCIDADE NA SIMULAÇÃO NUMÉRICA

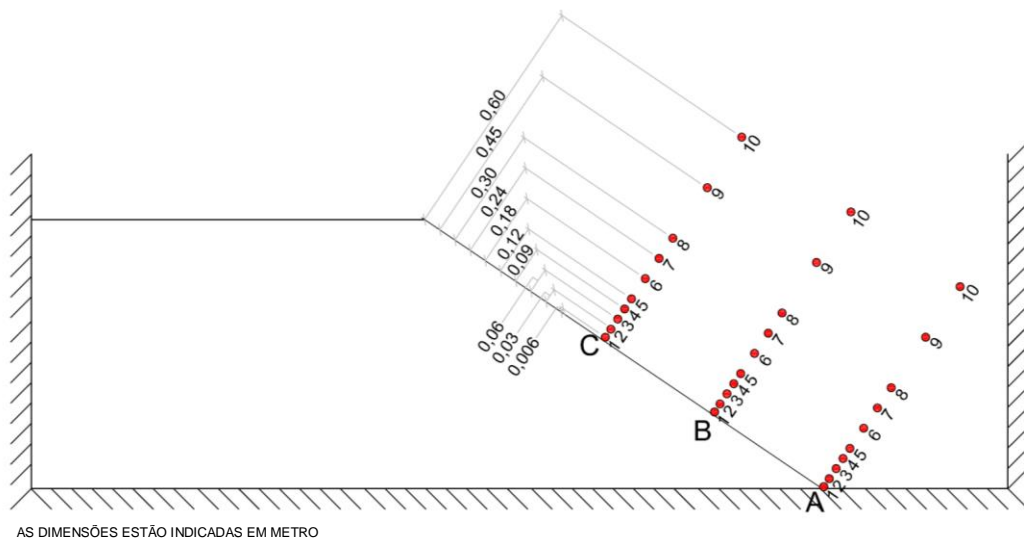


FIGURA 3.9 – INDICAÇÃO ESQUEMÁTICA DOS PONTOS DE REGISTRO DE VELOCIDADE NA SIMULAÇÃO NUMÉRICA EM UMA SEÇÃO NO EIXO DA ENSECADEIRA (90°)

As velocidades registradas por Pereira (2001) na região da ponta de aterro estão apresentadas nas TABELAS 3.2, 3.3 e 3.4.

TABELA 3.2 – VELOCIDADES REGISTRADAS NA SEÇÃO “A” NO MODELO FÍSICO NA INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL DE PEREIRA (2001)

Seção	Ponto	Velocidade (m/s)		
		Alinhamento 0°	Alinhamento 45°	Alinhamento 90°
A	1	0,142	0,221	0,340
	2	0,139	0,291	0,450
	3	0,142	0,291	0,466
	4	0,130	0,291	0,459
	5	0,142	0,286	0,476
	6	0,149	0,288	0,472
	7	0,153	0,295	0,463
	8	0,137	0,304	0,473
	9	0,160	0,312	0,481
	10	0,142	0,274	0,484

TABELA 3.3 – VELOCIDADES REGISTRADAS NA SEÇÃO “B” NO MODELO FÍSICO NA INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL DE PEREIRA (2001)

Seção	Ponto	Velocidade (m/s)		
		Alinhamento 0°	Alinhamento 45°	Alinhamento 90°
B	1	0,130	0,300	0,342
	2	0,149	0,340	0,517
	3	0,153	0,338	0,512
	4	0,142	0,341	0,518
	5	0,142	0,344	0,515
	6	0,146	0,337	0,504
	7	0,183	0,336	0,495
	8	0,183	0,322	0,498
	9	0,183	0,314	0,480

TABELA 3.4 – VELOCIDADES REGISTRADAS NA SEÇÃO “C” NO MODELO FÍSICO NA INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL DE PEREIRA (2001)

Seção	Ponto	Velocidade (m/s)		
		Alinhamento 0°	Alinhamento 45°	Alinhamento 90°
C	1	0,183	0,397	0,370
	2	0,214	0,426	0,530
	3	0,197	0,425	0,529
	4	0,201	0,412	0,527
	5	0,201	0,412	0,523
	6	0,205	0,389	0,524
	7	0,187	0,389	0,509

### 3.1.2 Modelagem Numérica

O modelo numérico utilizado para as simulações realizadas neste trabalho foi o FLOW 3D<sup>®</sup>, desenvolvido pela companhia “Flow Science Inc”. Este é um programa numérico tridimensional chamado de Dinâmica dos Fluidos Computacional ou, em inglês, CFD “Computational Fluid Dynamics”.

O programa resolve as equações de Navier-Stokes combinando os métodos de discretização de diferenças finitas e volumes finitos sobre malhas cartesianas estruturadas. (SOUZA; MATOS; SILVA, [20--]). Além disso, o Flow-3D consegue modelar escoamentos turbulentos utilizando os chamados modelos de turbulência. Permite modelar geometrias complexas devido à formulação denominada “FAVOR – Fractional Area/Volume Obstacle Representation Method” (FLOW SCIENCE, 2011). Essa técnica, introduzida por Hirt e Sicilian (1985<sup>x</sup>, citado por Souza; Matos; Silva, [20--]), é um método de fração do volume no qual a geometria é definida com base na parcela das células ocupadas pelo sólido.

O FLOW 3D<sup>®</sup> utiliza o método do “Volume of Fluid (VOF)” que é aplicado com o propósito de discretizar a superfície livre do escoamento. Isso significa que o programa exclui do cálculo as células que não contribuem para o fluxo. Esse conceito traz a vantagem de diminuir o tempo de simulação (FLOW SCIENCE, 2011).

#### 3.1.2.1 Definição da Geometria

A determinação da geometria a ser simulada é a primeira atividade para a simulação numérica. O objetivo é definir a geometria adequada e o detalhamento necessário para o que se está buscando na simulação. Assim, nem sempre a geometria mais detalhada é a mais adequada.

Em modelos numéricos, a representação de geometrias complexas é uma preocupação. Para tal, o FLOW 3D<sup>®</sup> utiliza o método chamado *Fractional*

---

<sup>x</sup> HIRT, C.W.; SICILIAN, J.M. A **Porosity Technique for the Definition of Obstacles in Rectangular Cell Meshes**. 4th International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics, National Academy of Science. Washington, Estados Unidos da América, 1985.

*Area/Volume Obstacle Representation (FAVOR)* que oferece um modo preciso de determinar geometrias angulosas dentro das células das malhas. A partir desse método, define-se a fração de volume e área da célula que está parcialmente ou totalmente ocupada por obstáculos. Quando o indicador dessa característica marca o valor zero, a célula está completamente ocupada por obstáculo e então todos os cálculos de escoamento são eliminados nessa célula (FLOW SCIENCE, 2011).

A partir das dimensões do canal e ensecadeira simulados em modelo físico, a geometria para a simulação numérica foi desenvolvida no *software* AUTOCAD. Foram criados dois sólidos. Um que representa o canal e outro que representa a ensecadeira. A geometria utilizada buscou representar o canal e a ensecadeira da mesma maneira como foi representado no modelo físico. A rugosidade para a ensecadeira simulada foi definida igual à rugosidade do material da ensecadeira no modelo reduzido: 7,42 mm. O canal da simulação, construído em concreto no laboratório de hidráulica, teve sua rugosidade adotada para as simulações em FLOW 3D® igual a 0,4 mm.

O canal para o estudo numérico foi criado maior em comprimento (3 metros a montante e 1,45 metros a jusante) do que o canal em modelo físico com o objetivo de que as seções de leitura de vazão e nível de água a montante e a jusante não sejam as seções limítrofes extremas do modelo a fim de evitar interferências de acomodação do fluxo especialmente a montante. As FIGURAS 3.10 e 3.11 indicam o canal e ensecadeira para o estudo em modelo numérico.

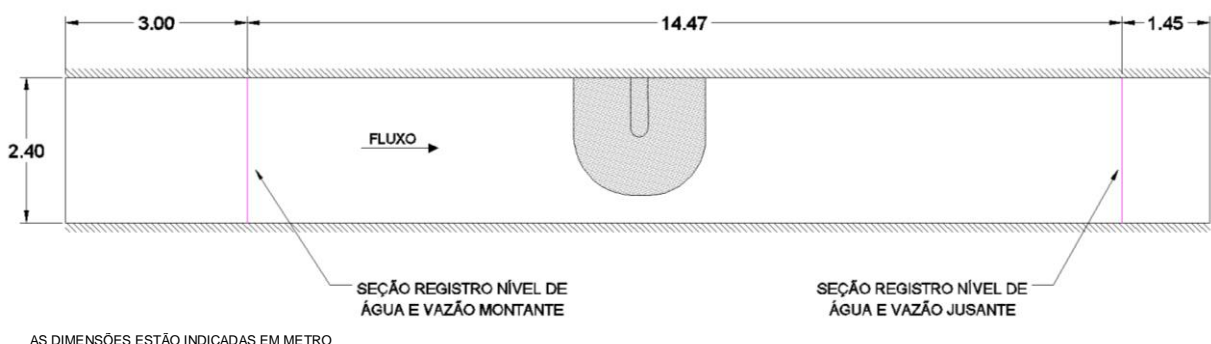


FIGURA 3.10 – PLANTA DO CANAL EM MODELO NUMÉRICO

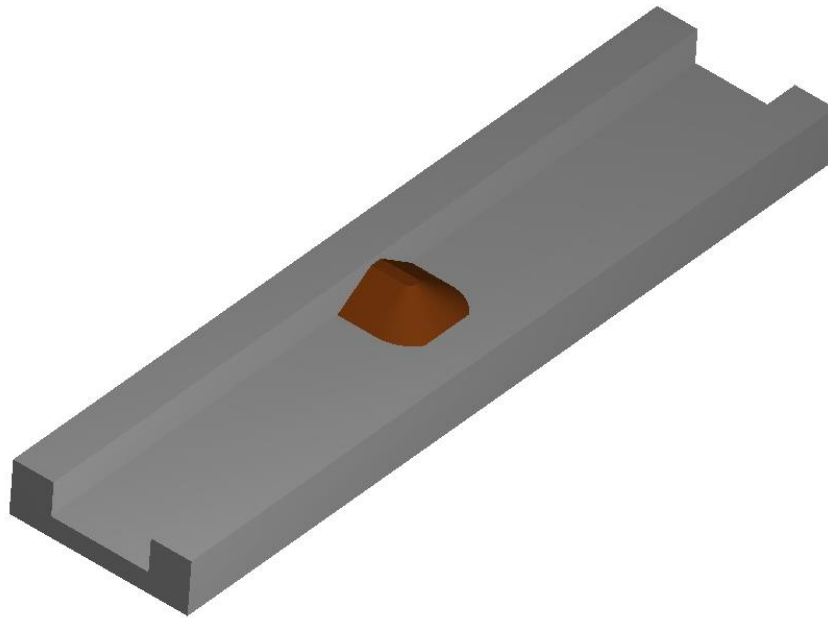


FIGURA 3.11 – CANAL E ENSECADEIRA EM MODELO NUMÉRICO

#### 3.1.2.2 Definição da Malha de Elementos

Após a determinação da geometria do elemento a ser simulado, deve ser definida a malha de elementos finitos a ser utilizada. Essa etapa é de extrema importância uma vez que a determinação da discretização ótima, que resulta no resultado adequado com o menor tempo de simulação, é um processo iterativo e influencia diretamente nos resultados da simulação.

O FLOW 3D<sup>®</sup> utiliza blocos de malhas ortogonais definidos em coordenadas cartesianas. Para uma maior discretização de regiões específicas, há que se criar blocos de malhas adicionais. O FLOW 3D<sup>®</sup> admite que a malha seja feita através de múltiplos blocos, ou seja, que sejam determinadas áreas de refinamento diferenciado, tantas quantas forem necessárias.

O ideal é que a malha tenha a maior discretização possível na modelagem computacional, entretanto, a demanda computacional que seria necessária para que isto fosse factível, não permite essa discretização. A qualidade de uma malha é determinada pela capacidade da mesma em reproduzir, de maneira adequada, o escoamento a que se propõe. Uma maneira de avaliar isto é através de análises de sensibilidade e comparação de resultados. Ou seja, analisar se o resultado varia quando é feita uma maior discretização da malha, e também, caso esteja disponível

um resultado objetivo da simulação, quanto a simulação está se aproximando do referido resultado.

É importante salientar que usualmente há diferença entre os dados do modelo reduzido e os resultados do modelo numérico. Esta diferença é uma característica inerente aos modelos numéricos. Isto ocorre devido às simplificações necessárias tanto na definição da geometria a ser modelada quanto na resolução dos métodos numéricos.

Havendo possibilidade de realização dos estudos em modelo físico, considera-se que este é o modelo que mais se aproxima à condição do protótipo. Nestes casos os estudos em modelos numéricos são importantes para o primeiro entendimento do problema e para diminuir as dúvidas e alternativas de estudo no modelo físico. Nas situações em que não se dispõe de modelo físico, o modelo numérico aparece como única alternativa para o estudo do problema em questão e, portanto deve ser bem calibrado para tal. O processo de calibragem representa a utilização dos dados e registros de projetos anteriores e semelhantes ao que se pretende estudar, para preparar e ajustar o modelo para o estudo que se pretende fazer (melhor malha de elementos, simplificações possíveis ou não na geometria, melhor método de cálculo, condições de contorno, entre outros).

Com o objetivo de minimizar e acelerar o tempo de simulação dos estudos deste trabalho definiu-se que as simulações seriam realizadas em série iniciando com uma primeira simulação com malha composta por elementos maiores, até a simulação final com malha mais densa. As malhas mais densas foram sendo inseridas na região da ensecadeira com objetivo de melhor caracterizar o fluxo naquela região de interesse, ou seja, na região da ponta de aterro.

Para garantir a correta compreensão da discretização das malhas, o FLOW 3D<sup>®</sup> exige que os blocos ortogonais da malha mais discretizada tenham arestas coincidentes com os elementos da malha menos discretizada. Para atender esta premissa, adotaram-se discretizações de malha que correspondem a arestas com metade do tamanho da aresta definida na discretização anterior (elementos cúbicos maiores). Esta definição segue exemplificada de maneira esquemática na FIGURA 3.12.

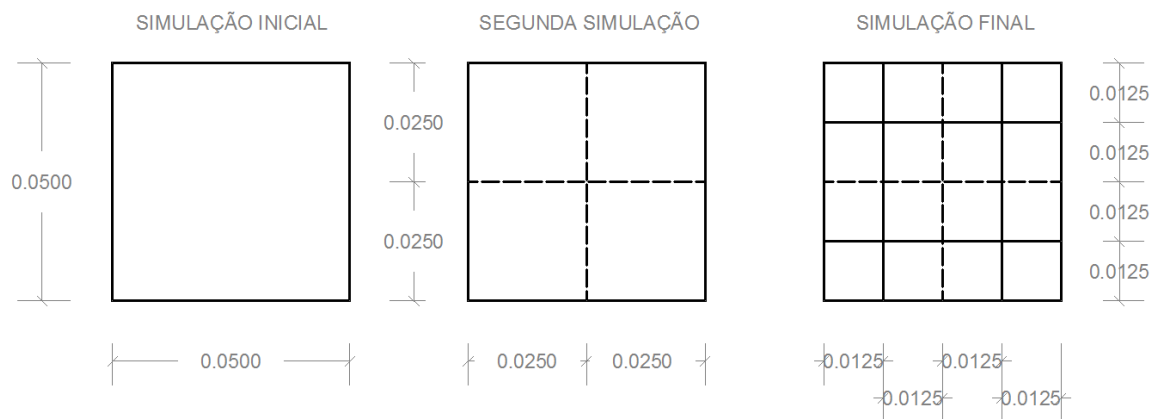


FIGURA 3.12 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA DISCRETIZAÇÃO DA MALHA DE ELEMENTOS FINITOS DAS SIMULAÇÕES MODELO NUMÉRICO

Definiu-se, para a primeira simulação, uma malha única em todo o canal com elementos cúbicos de 0,05 metros de aresta, conforme FIGURA 3.13, simulada por um tempo de 360 segundos (tempo real de escoamento).

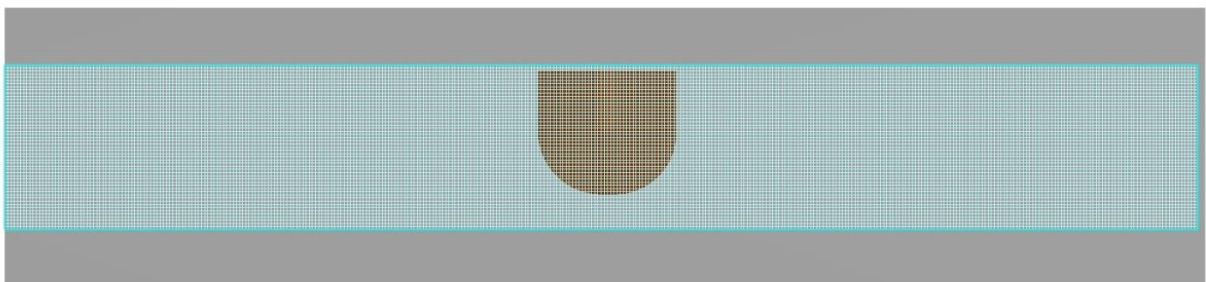


FIGURA 3.13 – MALHA DE ELEMENTOS FINITOS DA SIMULAÇÃO INICIAL EM MODELO NUMÉRICO

Para a segunda simulação, a discretização global de 0,05 metros foi mantida e uma região mais próxima à ensecadeira foi refinada com uma malha de 0,025 metros, em um comprimento que abrange 2,5 metros a montante da extremidade de jusante da ensecadeira definida por Pereira (2001). O tempo definido para esta simulação foi de 140 segundos adicionais a partir da primeira simulação já finalizada. A FIGURA 3.14 apresenta o aspecto geral da malha na segunda simulação.

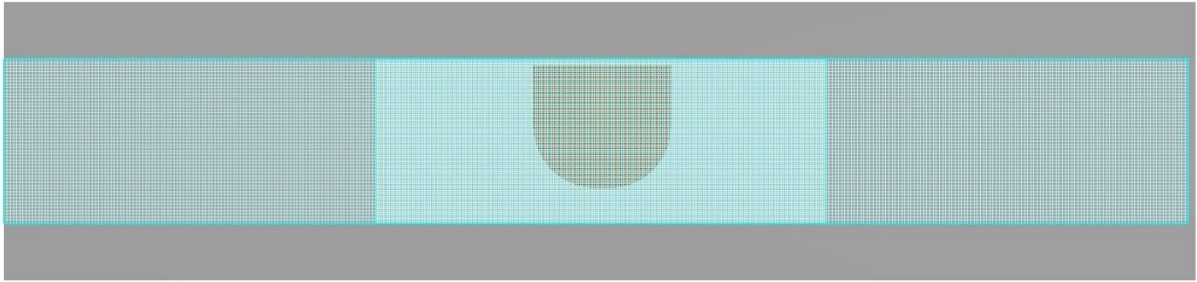


FIGURA 3.14 – MALHA DE ELEMENTOS FINITOS DA SEGUNDA SIMULAÇÃO EM MODELO NUMÉRICO

Para a simulação final, a partir da discretização já definida na segunda simulação, uma região ainda mais próxima da ensecadeira foi refinada com uma malha de 0,0125 metros, contemplando 0,5 metros a montante e 0,5 metros a jusante da extremidade de jusante da ensecadeira definida por Pereira (2001). Esta última configuração foi simulada por 100 segundos adicionais a partir da segunda simulação já finalizada, totalizando 600 segundos totais de simulação completa. A FIGURA 3.15 apresenta o aspecto geral da malha para esta simulação.

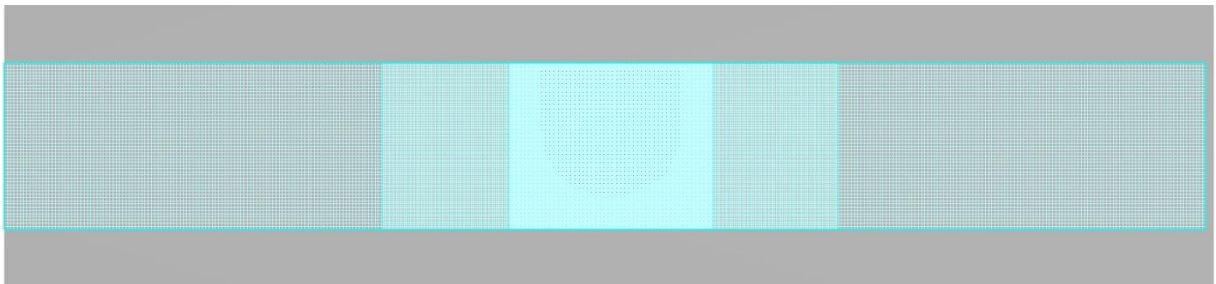


FIGURA 3.15 – MALHA DE ELEMENTOS FINITOS DA SIMULAÇÃO FINAL EM MODELO NUMÉRICO

A FIGURA 3.16 representa as geometrias distintas da ensecadeira representadas pelas malhas de elementos finitos de cada uma das três simulações realizadas. Observando no detalhe as três imagens da FIGURA 3.16, identifica-se a diferença na representação geométrica da ensecadeira e do canal resultado da interpretação de cada malha de volumes finitos. A malha da simulação final (FIGURA 3.16 c) representa a geometria da ensecadeira com uma maior precisão do que a malha da simulação inicial (FIGURA 3.16 a).

Na FIGURA 3.16 não está representada a rugosidade da ensecadeira considerada igual a 0,00742 m conforme ensaios em modelo físico reduzido

realizados por Pereira (2001). Também não está representada a rugosidade do canal, adotada igual a 0,0004 m, representando o canal de concreto em laboratório (acabamento liso). A rugosidade é um parâmetro que é inserido no cálculo nas simulações no FLOW 3D® e não é caracterizado de maneira geométrica no elemento a ser simulado. A diferença que se pretendeu ilustrar nessas imagens é com relação a qualidade da representação geométrica do canal e da ensecadeira resultado da discretização da malha nas três etapas da simulação numérica.

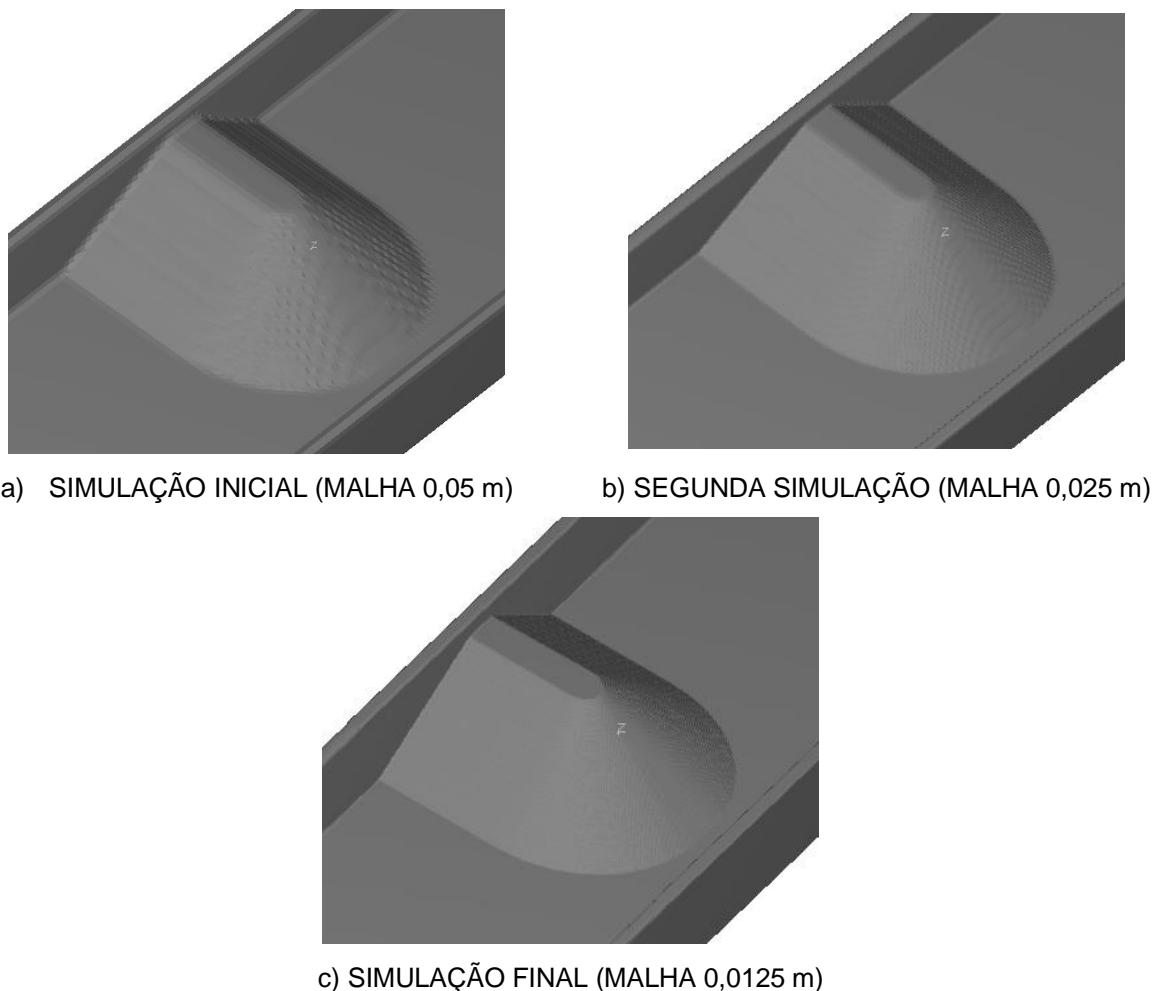


FIGURA 3.16 – COMPARAÇÃO DAS GEOMETRIAS DA ENSECADEIRA NAS TRÊS ETAPAS DE SIMULAÇÃO

### 3.1.2.3 Definição das condições de contorno e condição inicial de simulação

Tão logo estejam definidas a geometria a ser estudada e a malha de elementos para estudá-la, há necessidade de definir as condições de contorno. Para as simulações no FLOW 3D®, as condições de contorno são definidas nas faces dos

blocos da malha, assim cada bloco da malha possui seis condições de contorno, duas em cada uma das direções cartesianas.

O FLOW 3D<sup>®</sup> permite a escolha entre diversas opções de condições de contorno. Tais condições devem ser definidas para cada caso de estudo e dependem dos resultados esperados e das informações disponíveis para a simulação. Na sequência são apresentadas as condições de contorno utilizadas nos estudos deste trabalho.

As condições iniciais e de contorno para as simulações numéricas foram definidas a partir das informações disponíveis do problema em questão. No caso em estudo, estas condições foram definidas com base nos estudos de Pereira (2001) em modelo físico. Em casos em que não se encontram disponíveis resultados de simulações em modelo físico, é necessário que seja feita uma análise detalhada da questão a ser estudada e que sejam adotadas as condições de contorno mais adequadas com base no conhecimento teórico sobre o assunto e na experiência de outros casos semelhantes já estudados.

A condição inicial do estudo deve ser determinada a mais próxima possível da condição final esperada. Isso deve ser feito para que o modelo possa atingir o mais rápido possível a condição de escoamento permanente e para evitar instabilidades numéricas.

A condição inicial para as simulações deste trabalho de pesquisa foi definida como um nível de água constante ao longo de todo o canal igual ao nível de água da condição de contorno de jusante no eixo das abcissas da simulação. A FIGURA 3.17 ilustra o canal na condição inicial da simulação.

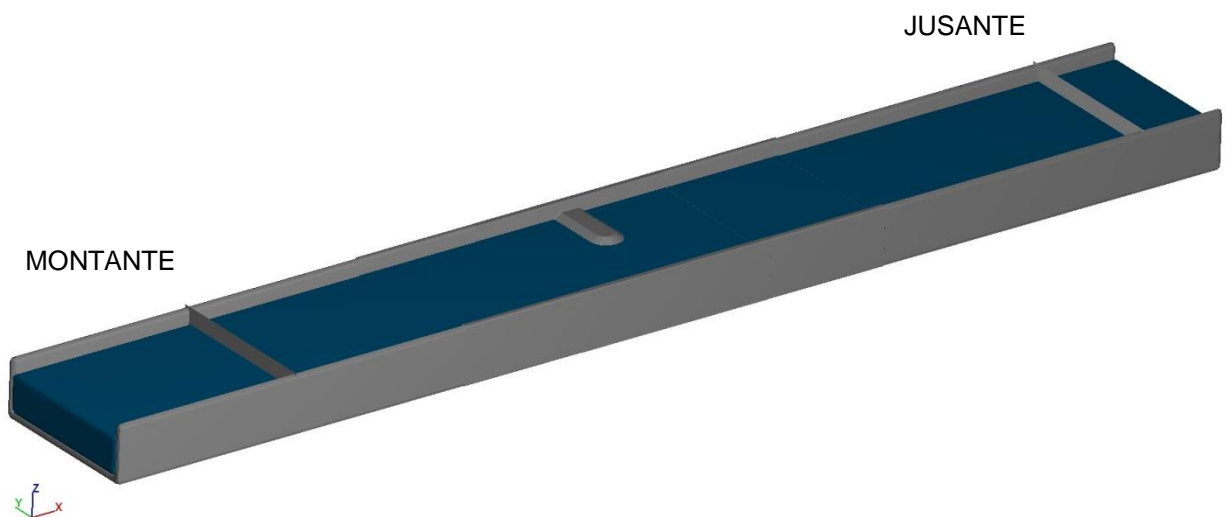


FIGURA 3.17 – CONDIÇÃO INICIAL DA SIMULAÇÃO EM MODELO NUMÉRICO

As condições de contorno para as simulações deste trabalho foram definidas da seguinte forma:

Eixo cartesiano x:

- Extremidade de montante: condição de simetria. Essa condição de contorno foi utilizada na extremidade de montante do canal para permitir a utilização da funcionalidade chamada de fonte quantidade de movimento, que permite inserir diretamente o valor da vazão afluente ao canal.
- Extremidade de jusante: Existem, tipicamente, dois tipos de condições de contorno do tipo pressão: estática ou de estagnação. Para a condição de pressão de estagnação, assume-se que o fluido entra no domínio da simulação com velocidade zero. Para a condição de pressão estática, a pressão é aproximadamente contínua ao longo do contorno e a velocidade no contorno é computada a partir da vazão e a respectiva área de escoamento. No modelo em estudo a condição de contorno na extremidade de jusante foi definida como pressão estática definida com o valor do nível de água que resulta o nível de água de montante no canal registrado por Pereira (2001) em seu ensaio em modelo físico. Isso foi feito através de processo iterativo da seguinte forma: adotou-se um nível de água de jusante, fez-se a primeira simulação e verificou-se o nível de água de montante. Adotou-se um novo nível de água de jusante até que se obteve um nível de água de montante igual àquele obtido por Pereira (2001) em seus estudos em modelo reduzido.

Eixo cartesiano y: Neste eixo, ambas as faces da malha foram definidas com a condição de contorno parede, pois são faces inseridas na parede do canal. Esta condição pressupõe a não existência de escoamento no limite determinado.

Eixo cartesiano z:

- Extremidade inferior: condição de contorno do tipo parede, inserida no fundo do canal;
- Extremidade superior: condição de contorno do tipo simetria.

A condição de contorno do tipo “simetria” também é utilizada quando existem blocos de malha adjacentes e/ou inseridos totalmente em outro bloco. Isso aconteceu nas simulações desta pesquisa para os casos das malhas de densificação da malha original (com 0,05 m), ou seja, o caso das malhas com 0,025

m e 0,0125 m. Nesses casos, a face de bloco adjacente e todas as faces do bloco inserido em outro bloco foram definidas com a condição de contorno “simetria”.

Algumas funcionalidades específicas oferecidas pelo software escolhido tem o objetivo de garantir a melhor representação da situação estudada em modelo numérico e também de permitir o registro das variáveis em análise (como velocidade, vazão, pressão) em locais determinados.

Uma dessas funcionalidades é a já citada fonte de quantidade de movimento (“*mass momentum source*”) que permite ao usuário inserir em qualquer local e orientação no domínio estudado uma taxa de fluxo e velocidade sem realmente ter que modelar a geometria de tal fonte. O usuário deve definir o local, a forma e a orientação dessa fonte.

Outras funcionalidades auxiliam no registro dos parâmetros em análise em locais especificamente definidos. Nos estudos deste trabalho foram utilizadas os chamados “*baffles*” e “*probes*” para essa função. São chamadas de “*baffles*” as seções nas proximidades de montante e de jusante do modelo numérico que permitem o registro de informações definidas pelo usuário como nível de energia e vazão naquela seção. A FIGURA 3.18 mostra a representação gráfica dos “*baffles*” feita pelo FLOW 3D®. Os “*probes*” são pontos definidos pelo usuário em locais específicos através de coordenadas “x”, “y” e “z” para o registro de informações como por exemplo velocidade.

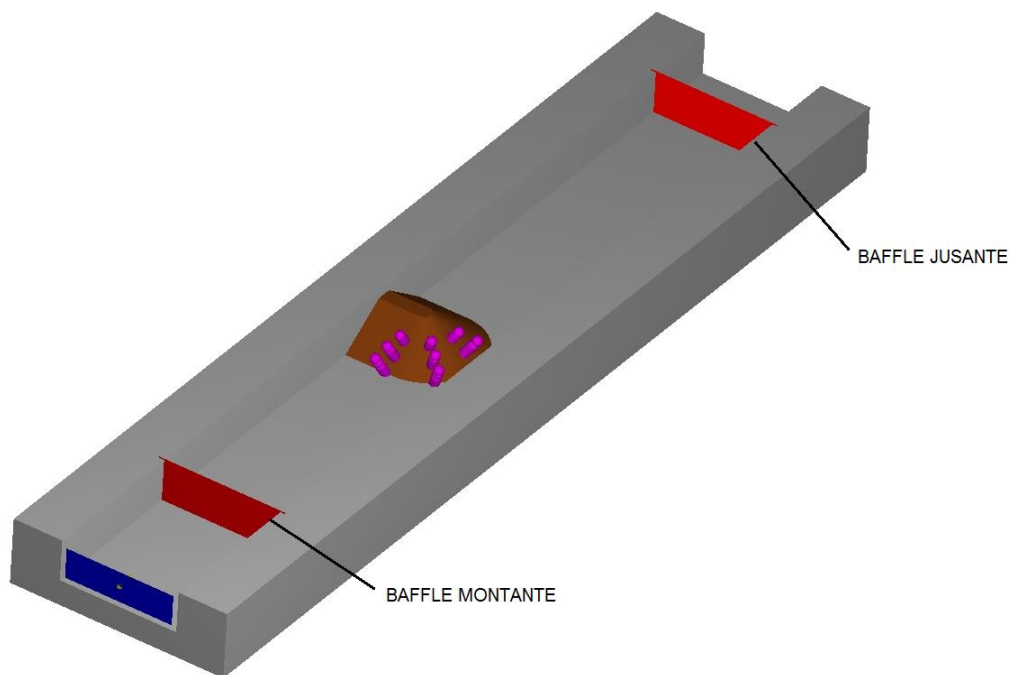


FIGURA 3.18 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DOS “BAFFLES”

A FIGURA 3.19 indica a representação gráfica do FLOW 3D<sup>®</sup> para os “*probes*” que aparecem no software como pontos para registro de alguns parâmetros específicos, como por exemplo, velocidade, inseridos em locais definidos pelo usuário.

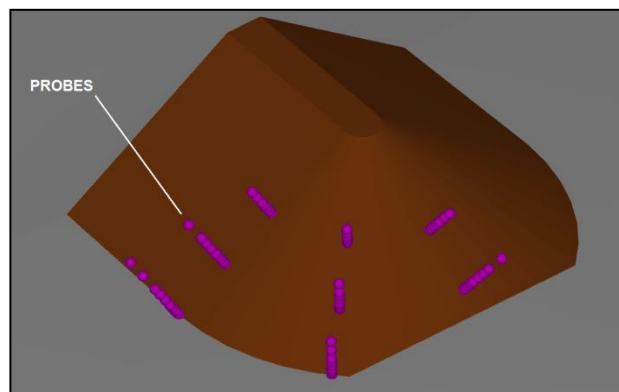


FIGURA 3.19 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DOS “PROBES”

### 3.1.2.4 Simulação

O tempo adequado para uma simulação numérica depende de cada estudo e basicamente representa o tempo total necessário para que não ocorram alterações significativas e importantes no comportamento do escoamento.

Esta análise é possível através da avaliação quantitativa dos parâmetros importantes do estudo ao longo do tempo, tais como vazão e velocidade além da própria avaliação qualitativa do escoamento ao longo do tempo. O FLOW 3D<sup>®</sup> consegue apresentar gráficos de diversos parâmetros relacionados ao tempo para auxiliar o usuário nessa decisão. Dessa forma, através de simulações sucessivas é possível definir qual o tempo de simulação adequado em um determinado estudo.

É claro que quanto maior a discretização necessária, maior o tempo de simulação. Com o objetivo de minimizar este problema, o FLOW 3D<sup>®</sup> permite que se façam simulações chamadas de “*restart*”. Essa opção permite que uma nova simulação, mais discretizada, seja inicializada a partir de resultados de uma simulação anterior, menos discretizada. Isso permite que o maior esforço inicial de uma simulação seja realizado com uma malha menos discretizada, e só na sequência, quando o escoamento já se apresenta com menor variação ao longo do tempo, é feita a discretização necessária do estudo com um tempo de simulação menor.

Para os estudos desta pesquisa, a sequência das simulações foi realizada conforme tempos que seguem descritos na TABELA 3.5.

TABELA 3.5 – TEMPOS DAS SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

<b>SIMULAÇÃO</b>	<b>MALHA NA REGIÃO DA ENSECADEIRA</b>	<b>TEMPO REAL DE ESCOAMENTO<sup>(1)</sup></b>	<b>TEMPO APROXIMADO DA SIMULAÇÃO<sup>(2)</sup></b>
INICIAL	0,05 m	360 segundos	5 horas
SEGUNDA	0,025 m	140 segundos	8 horas
FINAL	0,0125 m	100 segundos	72 horas

NOTAS:

- (1) O tempo real de escoamento é o nome dado ao tempo definido pelo usuário no programa adotado, o FLOW 3D<sup>®</sup>, tempo julgado como suficiente para solucionar o escoamento que está sendo simulado;
- (2) O tempo aproximado da simulação é o tempo real que o computador utilizado para a simulação demora para simular o tempo definido como tempo real de escoamento. Por exemplo, para o

caso da simulação inicial, o tempo definido pelo usuário como 360 segundos reais de escoamento no FLOW 3D<sup>®</sup> resultaram em aproximadamente 5 horas de simulação na máquina utilizada para esse fim.

### 3.1.2.5 Análise

Com a finalidade de analisar se a simulação foi adequada e, portanto, se o modelo numérico escolhido fica validado para os estudos subsequentes, os dados obtidos dos ensaios com o FLOW 3D<sup>®</sup> foram tabulados e comparados com a investigação em modelo físico realizada por PEREIRA (2001). Aceitou-se como válido o estudo desse tipo de escoamento no modelo numérico FLOW 3D<sup>®</sup> baseado na comparação dos registros de velocidade em modelo numérico com os resultados de velocidade registrados no modelo físico por PEREIRA (2001).

Para a análise dos resultados registrados em modelo numérico, adimensionalizaram-se as velocidades medidas em função da velocidade média do fluxo de aproximação ( $U$ ), e as distâncias de medida em função da profundidade do fluxo a montante ( $H$ ) e compararam-se esses resultados com aqueles obtidos por Pereira (2001) em modelo físico.

## 3.2 MATERIAL EM PONTA DE ATERRO

Nesta etapa, foram simuladas configurações de cordões de fechamento de rio em ponta de aterro variando dois aspectos principais da geometria da enseadeira:

- Largura da crista (e como consequência raio da ponta de aterro); e
- Inclinação do talude.

Para que fosse possível realizar a comparação e a definição do efeito da variação desses dois aspectos geométricos da ponta de aterro, a área da brecha provocada pela enseadeira original definida por Pereira (2001) em modelo físico, foi mantida fixa nos estudos da 2ª etapa.

Para cada simulação realizada, além da manutenção da área da brecha, e portanto da velocidade média na brecha, foram mantidas a vazão e os níveis de

água a montante e a jusante no canal garantindo as mesmas condições dos ensaios de Pereira (2001). De maneira a comparar todas as simulações realizadas foram feitos registros da tensão tangencial, velocidade e definidas as linhas de corrente no entorno do cordão de enrocamento.

Objetivou-se entender o efeito resultante no escoamento na região da ponta de aterro devido à variação dos dois parâmetros geométricos que foram estudados (largura da crista e inclinação do talude).

### 3.2.1 Largura da crista da ensecadeira (e raio da ponta de aterro)

Os primeiros estudos desta etapa foram realizados variando a largura da crista do cordão de enrocamento. Para esse estudo planejou-se comparar com a configuração original (ensecadeira definida por Pereira (2001) em estudos em modelo físico) e outras três configurações de largura da crista.

#### 3.2.1.1 Definição da Geometria

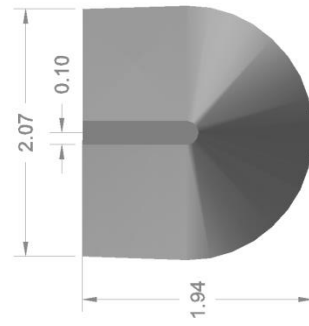
Apenas a geometria da ensecadeira foi alterada nessas simulações. O canal para o estudo em modelo numérico foi mantido exatamente o mesmo para todas as simulações deste trabalho.

As geometrias das ensecadeiras definidas para essa etapa de estudo seguem apresentadas na

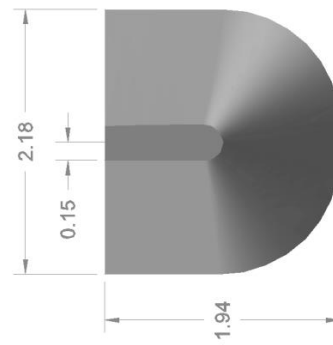
FIGURA 3.20 em comparação com a geometria da ensecadeira da simulação original conforme configuração do estudo experimental em modelo físico realizado por Pereira (2001). As ensecadeiras foram definidas sem alterar a área da brecha.

Esses estudos foram realizados em modelo numérico considerando os mesmos critérios descritos no Item 3.1. A cada simulação foram verificadas as condições de vazão e nível de água a montante garantindo que esses parâmetros, bem como a brecha proporcionada pelo cordão de enrocamento, fossem mantidos fixos e a única variação neste caso foi a largura da crista do cordão, e como consequência do raio da ponta de aterro.

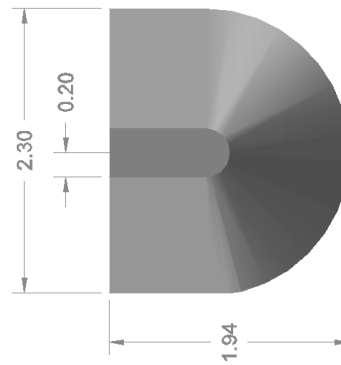
Ensecadeira R = 0,1 m



Ensecadeira Original (R = 0,15 m)



Ensecadeira R = 0,2 m



Ensecadeira R = 0,4 m

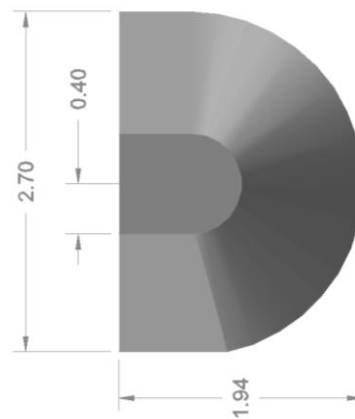


FIGURA 3.20 – ESTUDO DA VARIAÇÃO DA LARGURA DA CRISTA

Os pontos de leitura das informações (“*probes*”) foram especificados em cada ensecadeira de estudo conforme distâncias definidas por Pereira (2001) e descritas no item 3.1.1 deste trabalho. Salienta-se que, com a alteração da largura da crista dos cordões e conseqüentemente, dos raios da ponta de aterro, os pontos de leitura acompanharam essas alterações conforme pode ser observado graficamente na FIGURA 3.21, com o objetivo de manter os critérios de perpendicularidade e distância dos pontos de registro à ponta de aterro.

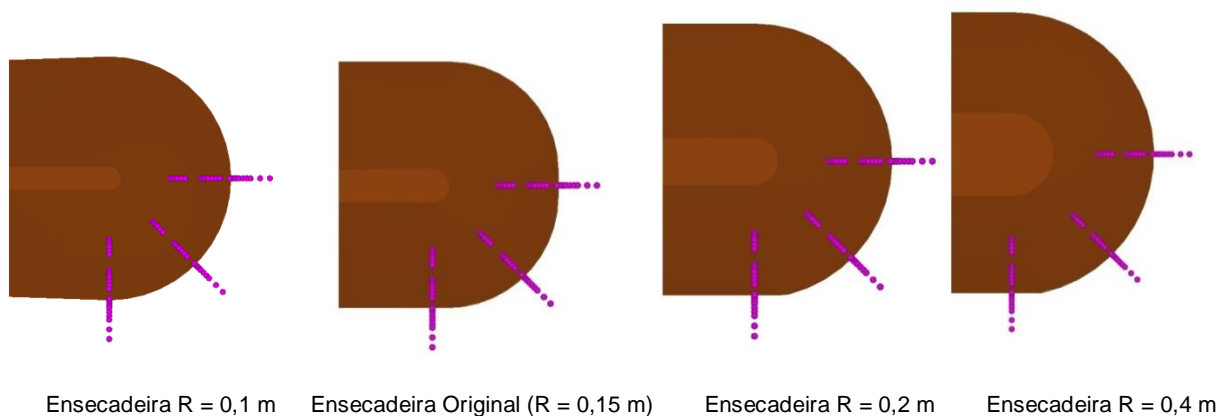


FIGURA 3.21 – PONTOS DE LEITURA DE VELOCIDADES (“*PROBES*”) CONSIDERANDO A VARIAÇÃO DA LARGURA DA CRISTA

### 3.2.1.2 Análise

Com a finalidade de comparar as quatro configurações simuladas de ensecadeira em ponta de aterro, considerando a alteração da largura da crista, e como consequência, alteração do raio da ponta de aterro, os resultados numéricos de velocidade obtidos dos ensaios com o FLOW 3D<sup>®</sup> foram tabulados e comparados de forma gráfica. Também foram analisados resultados de tensão tangencial e as linhas de corrente do escoamento na região da ponta de aterro.

Para a análise dos resultados de velocidade registrados em modelo numérico, adimensionalizaram-se as velocidades medidas em função da velocidade média do fluxo de aproximação (U), e as distâncias de medida em função da profundidade do fluxo a montante (H) e compararam-se os resultados das quatro simulações. O comportamento da velocidade do escoamento na região da ponta de

aterro também foi analisado em escala gráfica de cores. A análise da tensão tangencial foi realizada através de escala gráfica de cores que também indica a localização, na ponta de aterro, dos valores máximos deste parâmetro. Foram traçadas as linhas de corrente do escoamento e posteriormente foi realizada a comparação da linha de corrente traçada mais próxima da ponta de aterro e na porção mais próxima da superfície do escoamento de todas as alternativas com o objetivo de entender a variação da curvatura do escoamento nessa região.

### 3.2.2 Inclinação do Talude

Os estudos de variação da inclinação do talude foram realizados mantendo constante a área da brecha (e velocidade média na brecha).

#### 3.2.2.1 Definição da Geometria

O estudo dessa alteração foi realizado considerando uma configuração adicional conforme FIGURAS 3.22, 3.23 e 3.24.

Foi alterada apenas a geometria da ensecadeira na nova simulação. O canal do estudo em modelo numérico foi mantido exatamente o mesmo para todas as simulações deste trabalho.

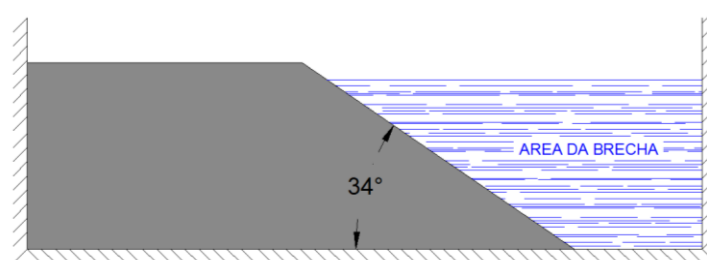


FIGURA 3.22 – ENSECADEIRA ORIGINAL - CORTE TRANSVERSAL NA BRECHA

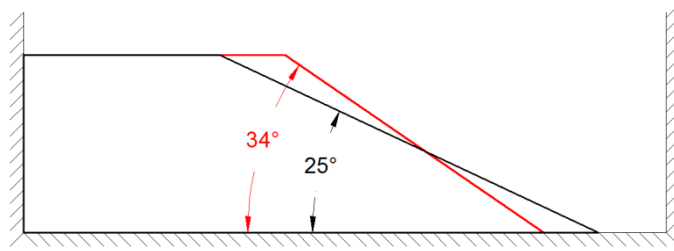


FIGURA 3.23 – ENSECADEIRA ORIGINAL (Talude 34°) e ENSECADEIRA TALUDE 25° - CORTE TRANSVERSAL NA BRECHA

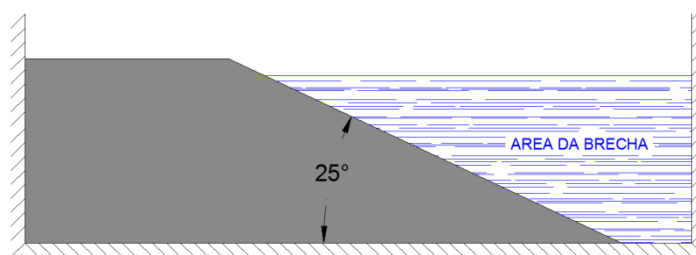


FIGURA 3.24 – ENSECADEIRA INCLINAÇÃO DO TALUDE 25° - CORTE TRANSVERSAL NA BRECHA

Para esta simulação, os pontos de leitura das informações (“*probes*”) também foram especificados em cada ensecadeira de estudo conforme distâncias definidas por Pereira (2001) e descritas no item 3.1.1 deste trabalho. Os pontos de leitura foram ajustados conforme a alteração realizada, pois foram definidos perpendiculares à ensecadeira de estudo. Os pontos de leitura da ensecadeira com talude com inclinação 25° podem ser observados na FIGURA 3.25 em comparação com os pontos de leitura na ensecadeira original (talude de 34°).

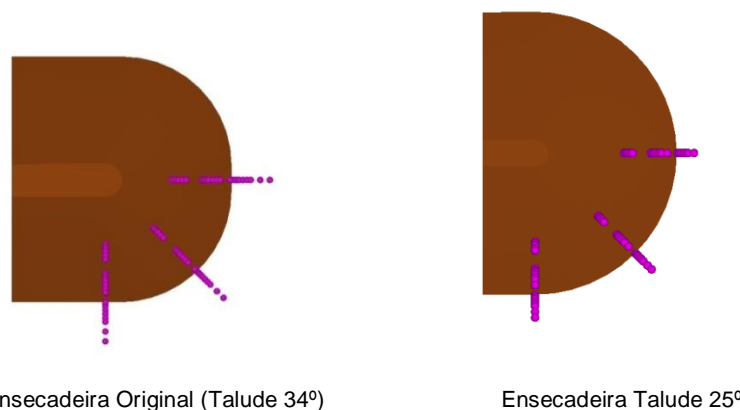


FIGURA 3.25 – PONTOS DE LEITURA DE VELOCIDADES (“PROBES”) CONSIDERANDO A VARIAÇÃO DA INCLINAÇÃO DO TALUDE

### 3.2.2.2 Análise

Com a finalidade de comparar as duas configurações: ensecadeira com a inclinação do talude de 25° e a ensecadeira original, com inclinação do talude de 34°, os resultados numéricos de velocidade obtidos dos ensaios com o FLOW 3D® foram tabulados e comparados. Também foram analisados resultados de tensão tangencial e as linhas de corrente do escoamento na região da ponta de aterro.

Para a análise dos resultados de velocidade registrados em modelo numérico, adimensionalizaram-se as velocidades medidas em função da velocidade média do fluxo de aproximação ( $U$ ), e as distâncias de medida ( $h$ ) em função da profundidade do fluxo a montante ( $H$ ) e compararam-se os resultados das duas simulações. O comportamento da velocidade do escoamento na região da ponta de aterro também foi analisado em escala gráfica de cores. A análise da tensão tangencial foi realizada através de escala gráfica de cores que também indica a localização, na ponta de aterro, dos valores máximos deste parâmetro. Foram traçadas as linhas de corrente do escoamento e posteriormente foi realizada a comparação da linha de corrente traçada mais próxima da ponta de aterro e na porção mais próxima da superfície do escoamento das duas alternativas com o objetivo de entender a variação da curvatura do escoamento nessa região.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo foi dividido em quatro subitens:

- 4.1) Estudo de Caso: são apresentados os resultados da primeira etapa de estudo, estudo numérico da investigação experimental e é feita a validação do modelo numérico escolhido, o Flow 3D;
- 4.2) Estudo da variação da largura da crista da ponta de aterro: são apresentados os resultados e feitas as análises da segunda etapa de estudo considerando a variação da largura da crista (e raio da ponta de aterro) da ensecadeira em ponta de aterro;
- 4.3) Estudo da variação da inclinação do talude da ponta de aterro: são apresentados os resultados e feitas as análises da segunda etapa de estudo considerando a variação da inclinação do talude da ensecadeira em ponta de aterro;
- 4.4) Considerações Finais: são apresentados de maneira sucinta os principais resultados e análises de resultados dos estudos realizados neste trabalho de pesquisa.

### 4.1 ESTUDO DE CASO

Os resultados numéricos da etapa de Estudo de Caso são apresentados no APÊNDICE 1. Para a análise, os resultados seguem apresentados adimensionalizados: as velocidades medidas em função da velocidade média do fluxo de aproximação ( $U$ ), e as distâncias de medida em função da profundidade do fluxo a montante ( $H$ ) comparados com os resultados obtidos por Pereira (2001) em sua investigação experimental em modelo físico.

A FIGURA 4.1 indica, na seção A de medição, mais próxima do fundo do canal, nos três alinhamentos da ensecadeira em ponta de aterro, a comparação dos resultados da simulação em modelo numérico com os resultados da simulação em modelo físico feita por Pereira (2001). Esta apresentação gráfica dos resultados permite identificar que há semelhança dos resultados das simulações em modelo físico e em modelo numérico. De maneira geral, a maioria (70%) dos pontos registrados de velocidade no modelo numérico nesta seção apresentou menos do

que 10% de diferença em relação aos registros de velocidade feitos nos mesmos pontos no modelo físico. Com relação aos demais pontos desta seção, as diferenças resultaram da ordem de 14%. De maneira pontual algumas diferenças resultaram maiores do que esta atingindo, no ponto mais próximo da ensecadeira no Alinhamento 0°, 55% e no ponto mais próximo da ensecadeira no Alinhamento 90°, 33% de diferença. Estas conclusões podem ser observadas de maneira gráfica na FIGURA 4.1.

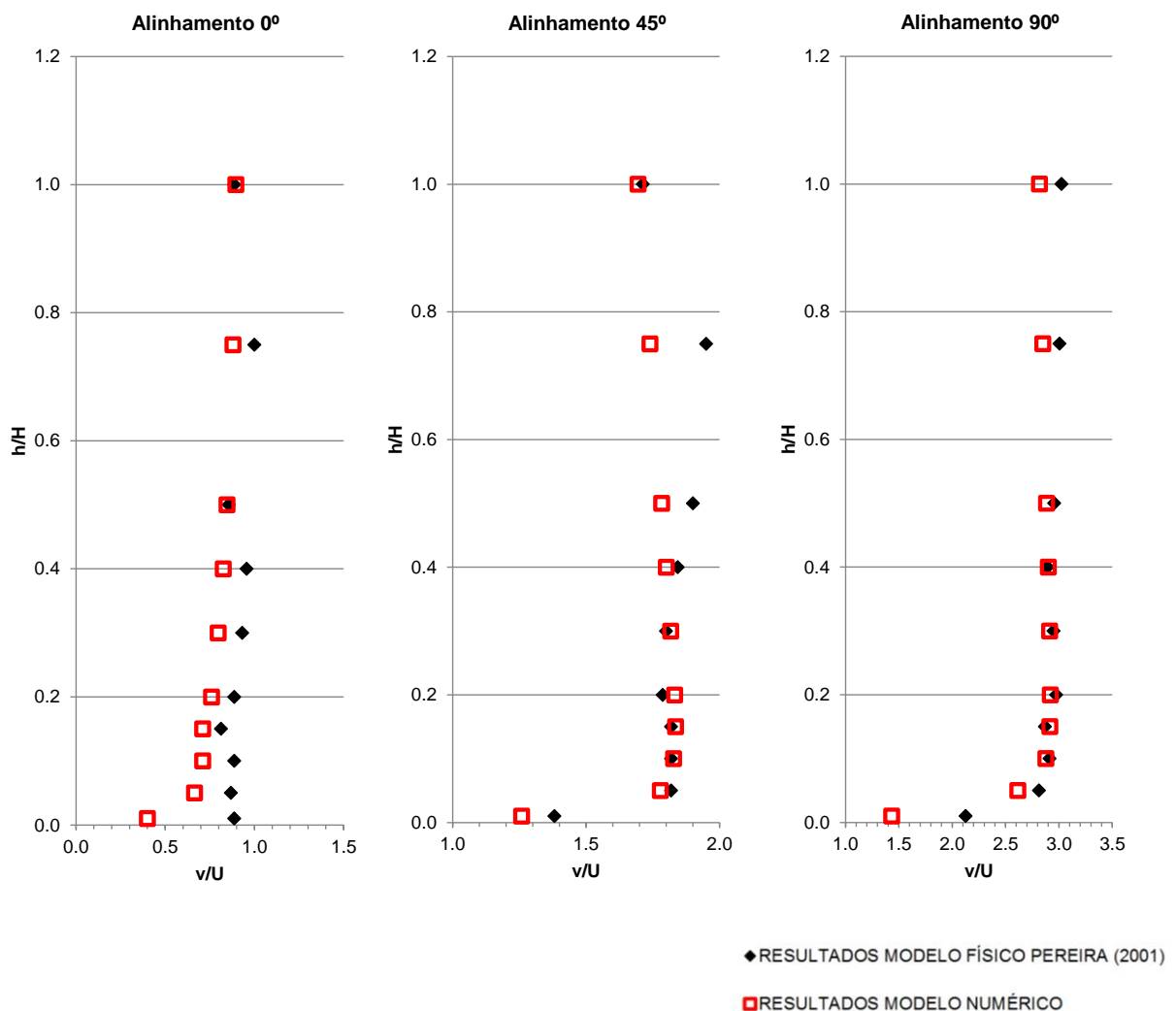
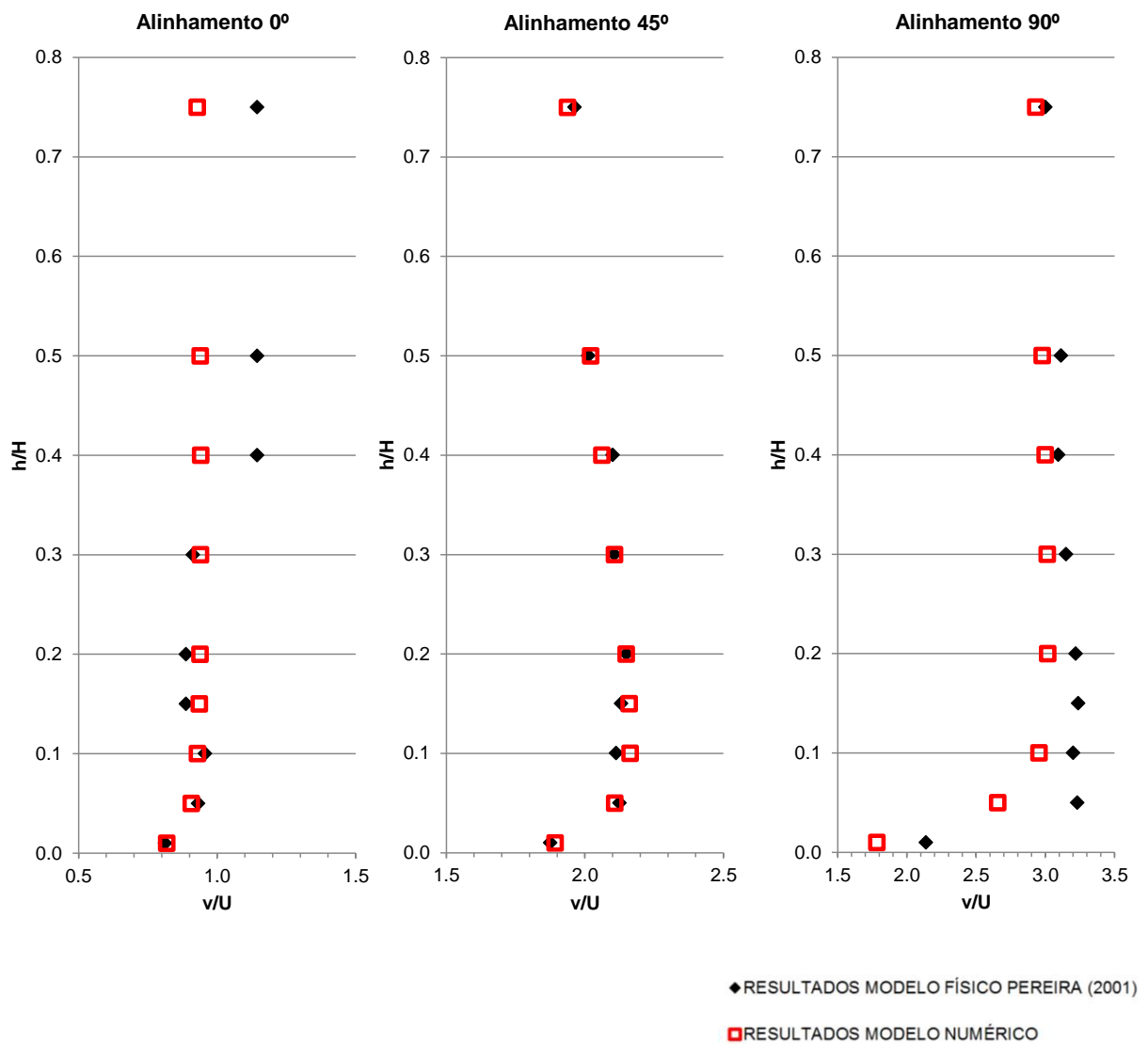


FIGURA 4.1 – RELAÇÃO  $(v/U)$  VERSUS  $(h/H)$  – SEÇÃO “A”

Os resultados da simulação numérica na seção “B”, intermediária entre o fundo do canal e a superfície, nos três alinhamentos da ensecadeira em ponta de aterro, são apresentados na FIGURA 4.2 em comparação com os resultados dos ensaios realizados em modelo físico por Pereira (2001). Essa apresentação gráfica

dos resultados permite identificar, nessa seção em todos os alinhamentos, a semelhança dos resultados das simulações em modelo físico e em modelo numérico. As maiores diferenças entre os resultados de modelo físico e modelo numérico nesta seção são da ordem de 18%. Além disso, a grande maioria (80%) dos registros de velocidade no modelo numérico apresentaram menos do que 8% de diferença em relação aos registros de velocidade feitos nos mesmos pontos no modelo físico.



NOTA: Nessa seção, não foi possível efetuar a leitura de velocidade no Ponto 4 do Alinhamento 90°

FIGURA 4.2 – RELAÇÃO (v/U) VERSUS (h/H) – SEÇÃO “B”

Na sequência, na FIGURA 4.3, estão apresentados os resultados da simulação em modelo numérico e da simulação em modelo físico feita por Pereira (2001) para a seção “C”, mais próxima da superfície, nos três alinhamentos da enseadeira em ponta de aterro. Essa apresentação gráfica dos resultados permite identificar a semelhança dos resultados em modelo numérico com os de modelo físico. De maneira pontual, os dois pontos mais próximos da enseadeira na seção no Alinhamento 90° resultaram da ordem de 20% diferentes dos resultados obtidos por Pereira (2001) em sua investigação experimental.

A grande maioria dos registros de velocidade nesta Seção no modelo numérico (80%) apresentou menos do que 10% de diferença em relação aos registros de velocidade feitos nos mesmos pontos no modelo físico.

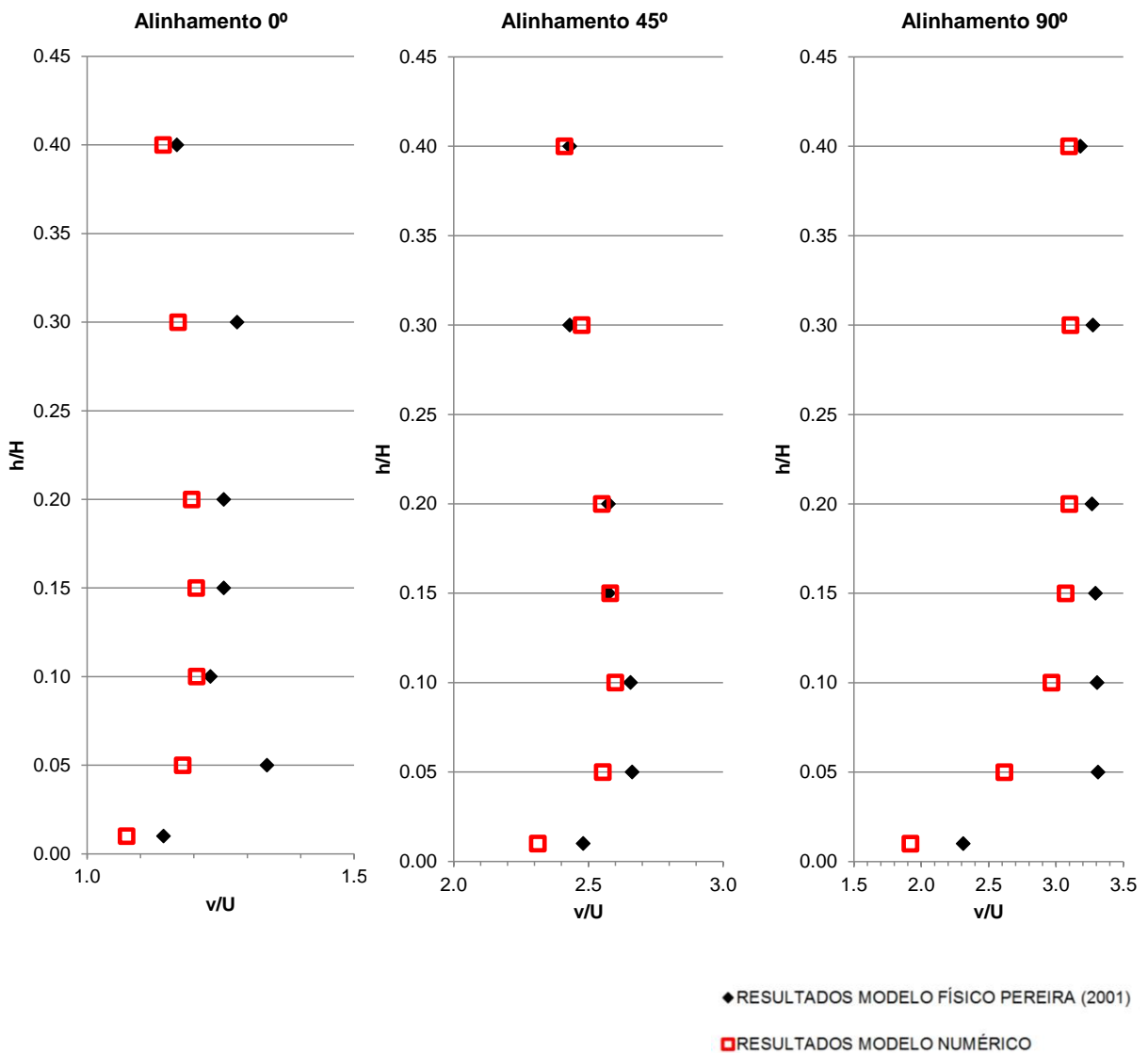


FIGURA 4.3 – RELAÇÃO (v/U) VERSUS (h/H) – SEÇÃO “C”

A maior diferença entre os resultados de velocidade registrada no modelo numérico e no modelo físico nos estudos da 1ª Etapa deste trabalho: Estudo de Caso, foi identificada no ponto mais próximo da ensecadeira na Seção “A”, no Alinhamento 0°, onde o registro de velocidade feito no modelo numérico resultou 55% menor do que o registro de velocidade no modelo físico. Os pontos 2 e 3 (também próximos à ensecadeira) no Alinhamento 0° da Seção “A” apresentaram diferenças menores em relação aos resultados de modelo físico, entretanto ainda apresentaram diferenças da ordem de 20%. Ainda na Seção “A”, o ponto mais próximo da ensecadeira no Alinhamento 90° também apresentou resultado 33% menor do que a velocidade registrada no modelo físico. Estas foram as maiores diferenças observadas entre os resultados de modelo numérico e do modelo físico.

Observando o comportamento dos perfis de velocidade adimensionalizados e representados nas FIGURAS 4.1, 4.2 e 4.3, é possível identificar que os pontos mais próximos da ensecadeira no Alinhamento 0° na Seção “A” acabaram por resultar fora da tendência esperada de acordo com o perfil que pode ser observado nos outros Alinhamentos das outras Seções. Ou seja, de maneira geral há uma tendência da diminuição da velocidade para os pontos mais próximos da ensecadeira. No Alinhamento 0° na Seção “A” esta tendência não é indicada nos registros de modelo reduzido, mas é indicada nos registros feitos no modelo numérico. Além destes registros, outros registros de velocidade feitos no modelo físico parecem estar fora da tendência indicada de maneira geral por todos os perfis de velocidade. Isto pode ser observado de maneira mais evidente, por exemplo, nos pontos 7, 8 e 9 do Alinhamento 0° da Seção “B” e no ponto 2 do Alinhamento 0° da Seção “C”.

Estas diferenças pontuais, que podem ser identificadas de maneira clara nas FIGURAS 4.1, 4.2 e 4.3, podem indicar um equívoco no registro de velocidade no modelo reduzido. E isto pode ser resultado da dificuldade de medição devido à utilização do tubo de Pitot-Prandtl para registro de velocidades no modelo físico. Pereira (2001) comenta sobre o fato dos registros de velocidade através deste equipamento ser bastante trabalhosa. Pereira (2001) também comenta em seu trabalho de pesquisa sobre a necessidade do tubo de Pitot-Prandtl estar alinhado com as linhas de corrente para a medição das velocidades, e especificamente com relação aos registros de velocidade para o Alinhamento 0° cita a grande dificuldade

de realizar os registros devido à instabilidade das linhas de corrente do escoamento nessa área.

As próximas considerações tem o objetivo de indicar a evolução dos resultados ao longo das três simulações realizadas, ou seja, considerando as diferentes malhas adotadas para as três simulações.

As simulações foram realizadas em série iniciando com uma primeira simulação com malha mais grosseira, até a simulação final com malha mais densa na região de interesse, região da ensecadeira em ponta de aterro, com objetivo de melhor caracterizar o fluxo naquela região.

A FIGURA 4.4 apresenta, para os mesmos pontos indicados na FIGURA 4.1, a evolução dos registros ao longo das três simulações no modelo numérico, considerando as três diferentes malhas utilizadas. Essa figura permite observar como a malha afetou os resultados da simulação no modelo numérico melhorando a semelhança entre o modelo numérico e modelo físico com o aumento da densidade da malha na região da ensecadeira especialmente para os pontos de medição localizados nas proximidades da ensecadeira.

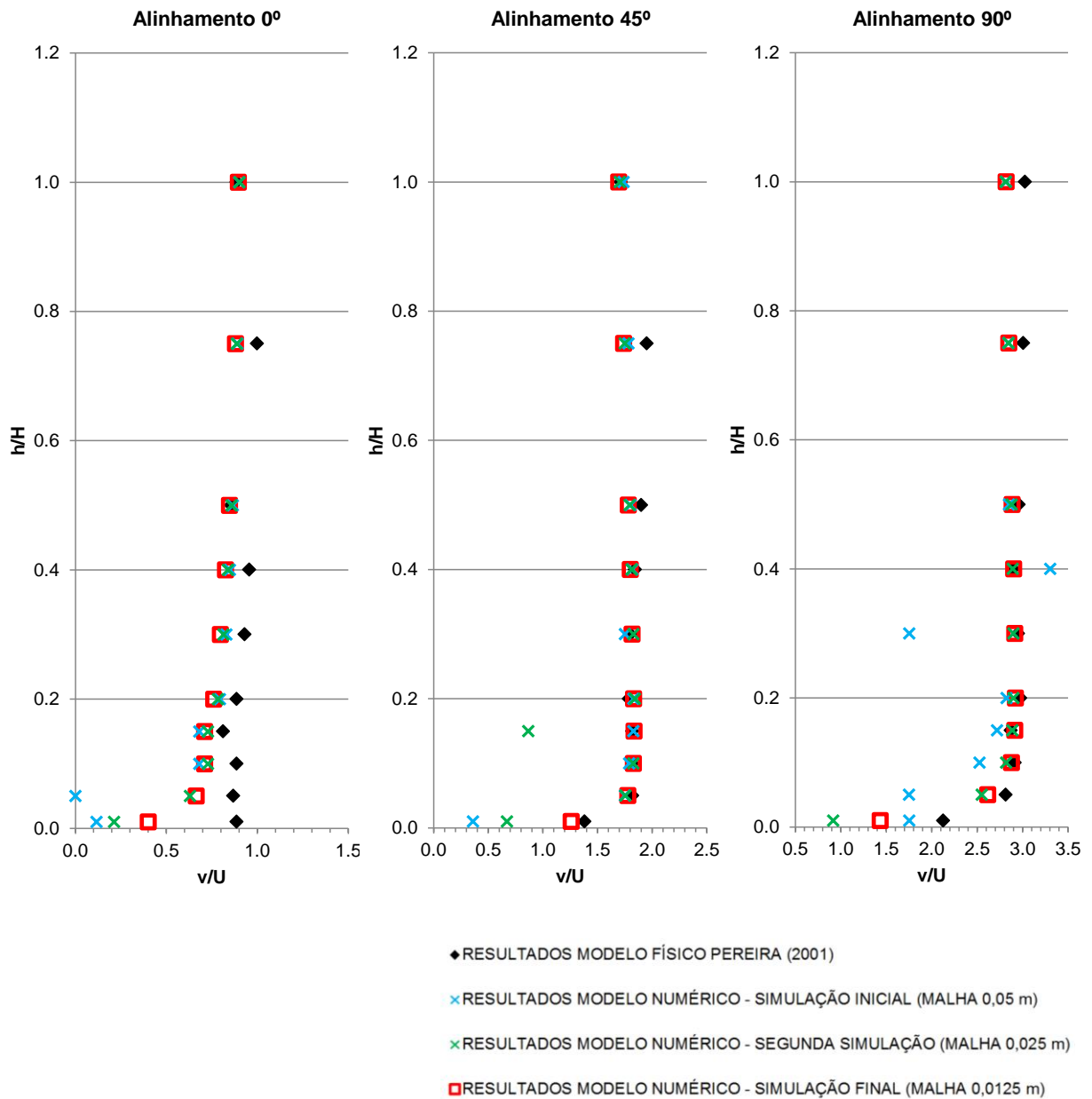
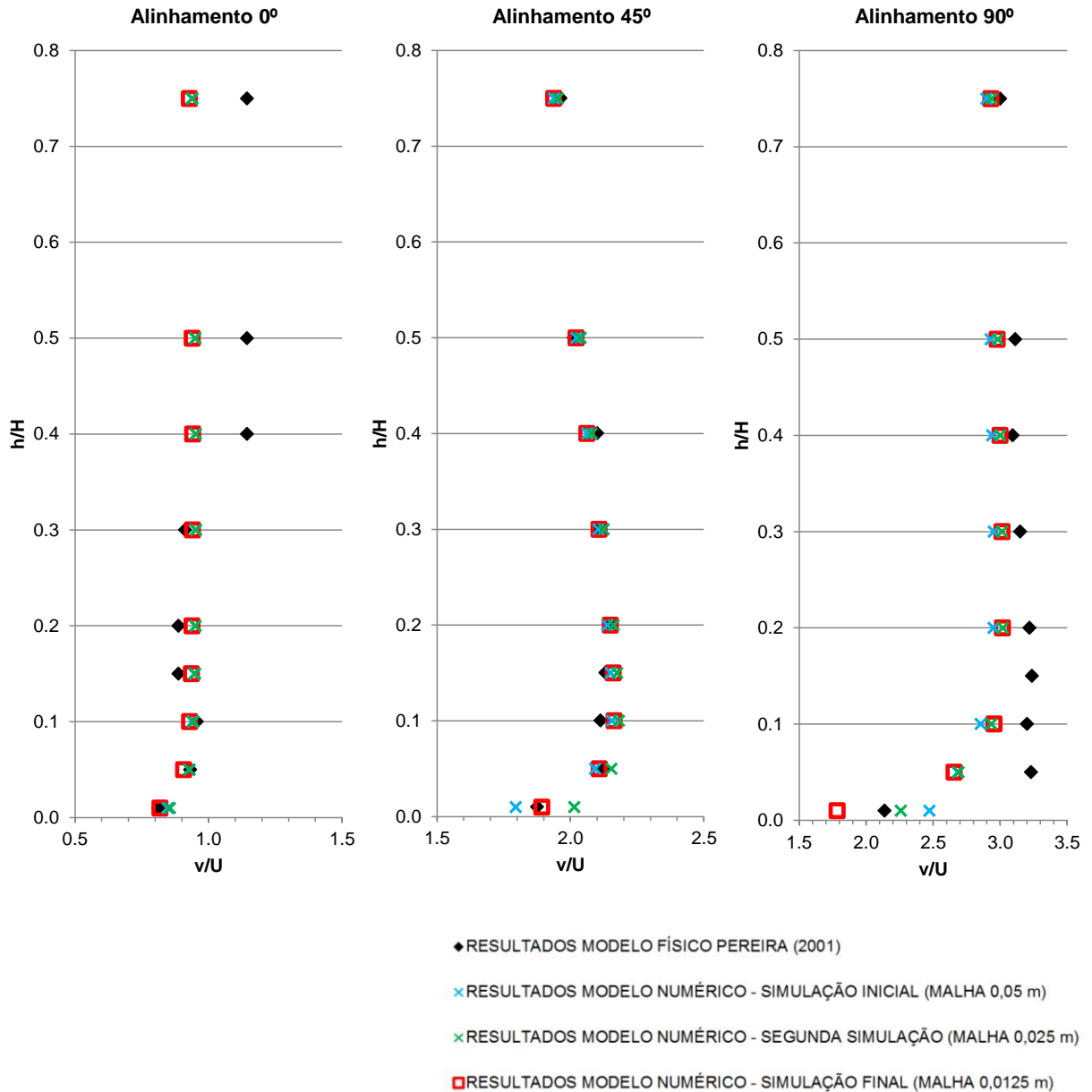


FIGURA 4.4 – EVOLUÇÃO DOS RESULTADOS AO LONGO DAS SIMULAÇÕES – SEÇÃO “A”

A FIGURA 4.5 apresenta, para os mesmos pontos indicados na FIGURA 4.2, a evolução dos registros ao longo das três simulações no modelo numérico considerando as três diferentes malhas utilizadas. Essa figura permite observar que para o caso da seção “B”, os resultados das três simulações realizadas considerando as três diferentes malhas em modelo numérico foram basicamente os mesmos. Uma melhora pequena nos resultados pode ser identificada no ponto 1 (ponto mais próximo da ensecadeira) dos alinhamentos 0° e 45°. Por outro lado o

ponto 1 do alinhamento 90° apresentou melhor resultado na segunda simulação numérica se comparado com a simulação final.



NOTA: Nessa seção, não foi possível efetuar a leitura de velocidade no Ponto 4 do Alinhamento 90°

FIGURA 4.5 – EVOLUÇÃO DOS RESULTADOS AO LONGO DAS SIMULAÇÕES – SEÇÃO “B”

A FIGURA 4.6 apresenta, para os mesmos pontos indicados na FIGURA 4.3 a evolução dos registros ao longo das três simulações no modelo numérico considerando as três diferentes malhas utilizadas para as simulações na seção “C”. Essa figura permite observar que, assim como para a seção “B”, para o caso da seção “C”, os resultados das três simulações em modelo numérico foram muito

semelhantes. Diferenças podem ser observadas de maneira mais evidente especialmente nos resultados dos pontos mais próximos à enseadeira.

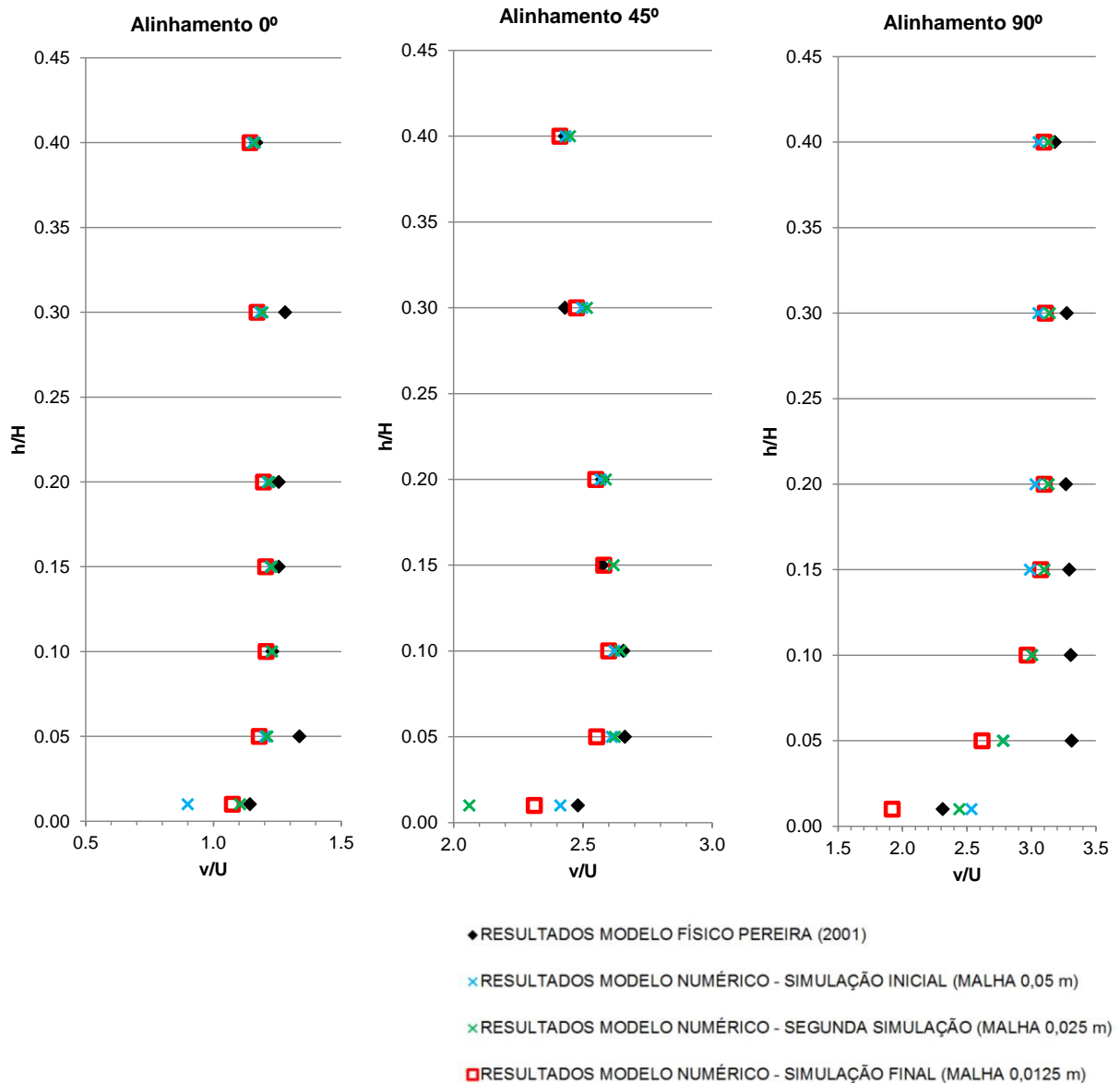


FIGURA 4.6 – EVOLUÇÃO DOS RESULTADOS AO LONGO DAS SIMULAÇÕES – SEÇÃO “C”

Esse processo de discretização da região de interesse do modelo a cada simulação garantiu a representação adequada do escoamento na região da enseadeira em estudo de maneira a garantir resultados satisfatórios.

Muito embora a malha definida como final tenha sido considerada satisfatória com resultados adequados, para fins exploratórios realizou-se a tentativa de densificar ainda mais a malha na região da enseadeira, com elementos cúbicos

com 0,00625 m de aresta. Entretanto, a demanda computacional dessa simulação não permitiu que de fato ela fosse concluída.

#### 4.2 VARIAÇÃO DA LARGURA DA CRISTA DA ENSECADDEIRA

Os resultados numéricos da segunda etapa de estudos considerando a variação da largura da crista da ensecadeira são apresentados no APÊNDICE 2.

Compararam-se os resultados das quatro configurações de ensecadeira simuladas:

- 1) Ensecadeira  $R = 0,1$  m, nome dado à simulação considerando o raio da ponta de aterro igual a 0,1 metro e o aumento correspondente da largura da crista da ensecadeira totalizando 0,2 metros;
- 2) Ensecadeira original, nome dado à simulação numérica reprodução da investigação experimental de Pereira (2001), com o raio da ponta de aterro (a montante) igual a 0,15 metros;
- 3) Ensecadeira  $R = 0,2$  m, nome dado à simulação considerando o raio da ponta de aterro igual a 0,2 metros e o aumento correspondente da largura da crista da ensecadeira totalizando 0,4 metros;
- 4) Ensecadeira  $R = 0,4$  m, nome dado à simulação considerando o raio da ponta de aterro igual a 0,4 metros e o aumento correspondente da largura da crista da ensecadeira totalizando 0,8 metros.

As FIGURAS 4.7, 4.8 e 4.9 indicam, para as três seções de medição: “A”, “B” e “C”, nos três alinhamentos estudados “0°”, “45°”, e “90°”, a comparação dos resultados da simulação numérica das quatro configurações geométricas da ponta de aterro considerando a variação do raio da ponta de aterro.

As tendências indicadas nas Figuras apresentadas na sequência podem ser descritas da seguinte maneira:

- As variações dos registros de velocidade no Alinhamento 0° para os quatro casos estudados é mais acentuada do que a variação nos Alinhamentos 45° e 90°;
- Os registros de velocidade no Alinhamento 0° das Seções A, B e C da ponta de aterro indicaram um aumento de até da ordem de 20% na velocidade do escoamento nas proximidades da ponta de aterro considerando a diminuição do raio

da ponta de aterro de 0,15 m (Ensecadeira Original) para 0,1 m. Este aumento é maior quanto mais próximo o ponto de registro está da ensecadeira. Ou seja, para os pontos de registro de velocidade mais distantes da ensecadeira no Alinhamento 0° as diferenças não foram maiores do que 4%;

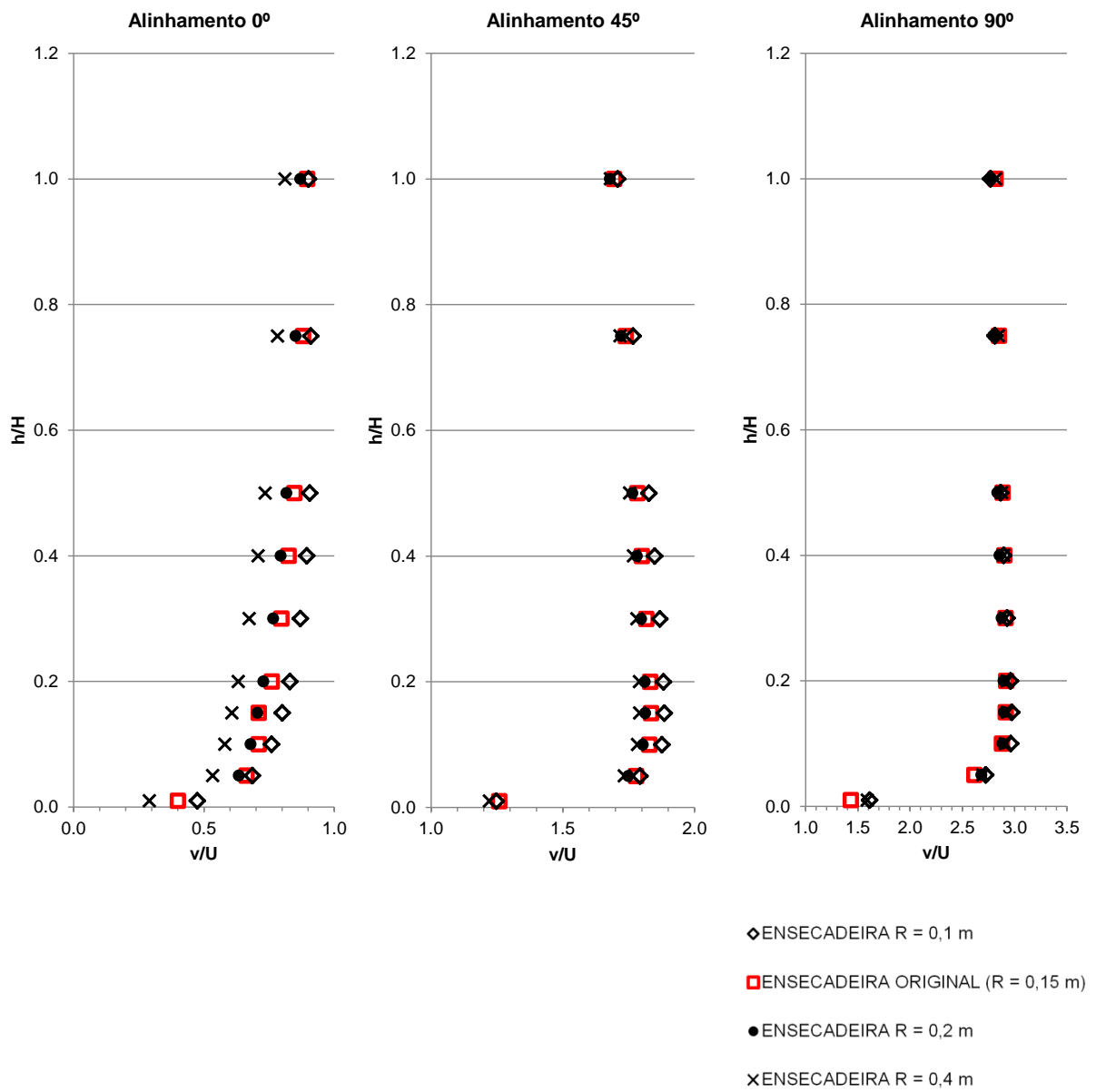
- Com relação ao aumento do raio da ponta de aterro a partir da Ensecadeira Original ( $R = 0,15$  m) para  $R = 0,2$  m e  $R = 0,4$  m há uma diminuição das velocidades na região da ponta de aterro de até 5% para o  $R = 0,2$  m em comparação com a ensecadeira original e da ordem de até 30% para a ensecadeira com raio de ponta de aterro  $R = 0,4$  m em comparação com a ensecadeira original ( $R = 0,15$  m);

- No caso do Alinhamento 45°, a diminuição do raio da ponta de aterro resultou em um aumento máximo das velocidades nos pontos de registro da ordem de 3%;

- Com relação ao aumento do raio da ponta de aterro para  $R = 0,2$  e  $R = 0,4$  m, a velocidades registradas na região da ponta de aterro nas três seções (“A”, “B” e “C”) no Alinhamento 45° tiveram a tendência de diminuir da ordem de 4% para a ensecadeira de  $R = 0,2$  m em relação à ensecadeira original e da ordem de 7% para a ensecadeira de  $R = 0,4$  m em relação à ensecadeira original;

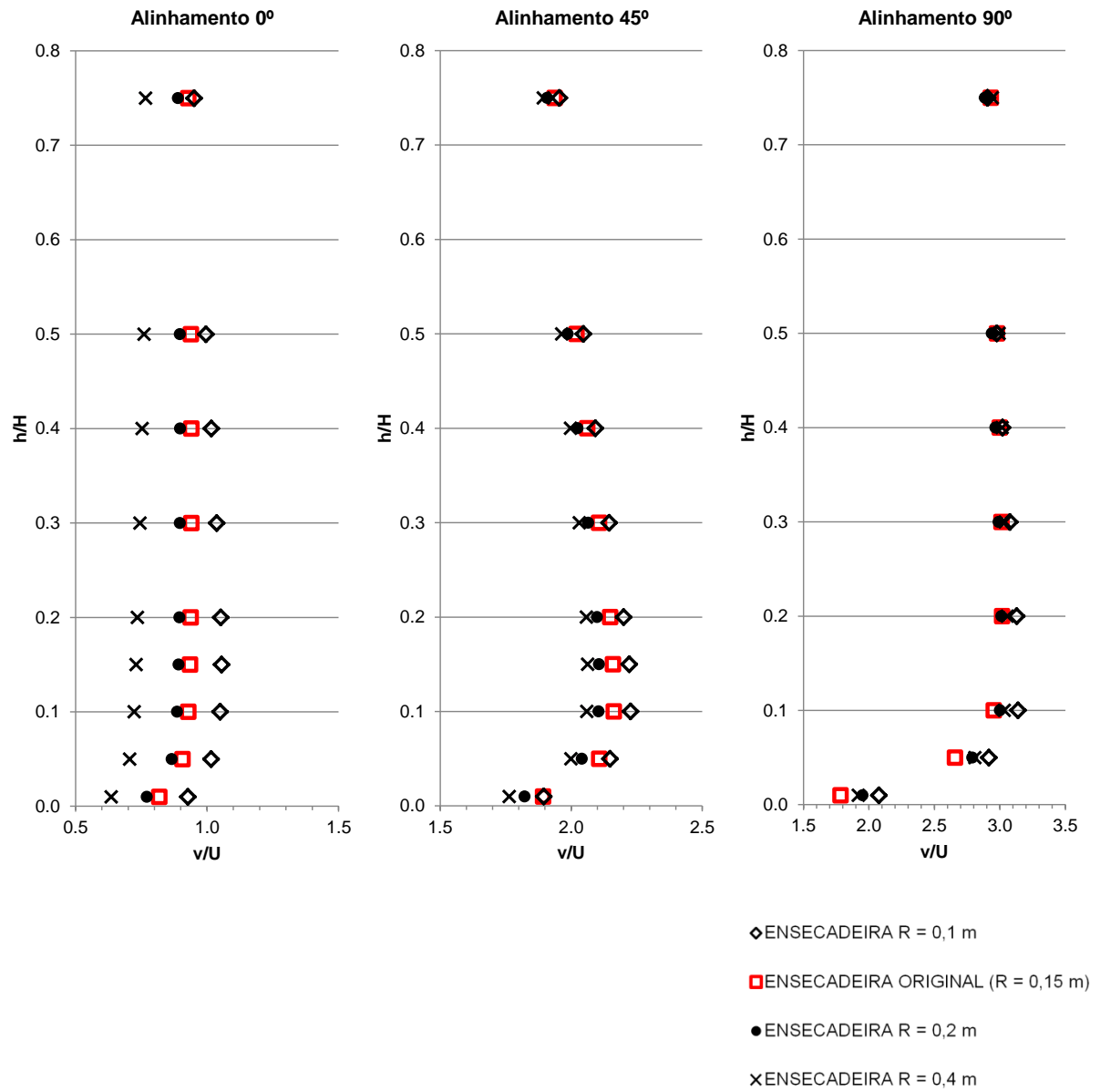
- Para o Alinhamento 90°, a diminuição do raio da ponta de aterro indicou um aumento de até 18% nas velocidades na região da ponta de aterro nos pontos de registro;

- O aumento do raio na ponta de aterro (tanto para  $R = 0,2$  quanto para  $R = 0,5$ ) indicou, para o Alinhamento 90°, uma diminuição da velocidade na ponta de aterro da ordem de 10% para pontos mais próximos da ensecadeira e variação da ordem de 1% (para mais e para menos) para os pontos mais distantes da ensecadeira. De maneira comparativa considerando a ordem de grandeza das demais variações nos valores registrados de velocidade, conclui-se que variações da ordem de 1% indicam que nestes pontos não houve variação importante nos registros de velocidade com a variação do raio da ponta de aterro.



NOTA: Nesta seção, a partir da análise dos resultados, o registro no ponto 1 para a simulação considerando a Ensecadeira com R = 0,2 m foi eliminado por apresentar resultado interpretado como incoerente.

FIGURA 4.7 – VARIAÇÃO DA LARGURA DA CRISTA DA ENSECADEIRA  
 RELAÇÃO (v/U) VERSUS (h/H) – SEÇÃO “A”



NOTA: Nessa seção, não foi possível efetuar a leitura de velocidade no Ponto 4 do Alinhamento 90°

FIGURA 4.8 – VARIÇÃO DA LARGURA DA CRISTA DA ENSECADEIRA  
 RELAÇÃO ( $v/U$ ) VERSUS ( $h/H$ ) – SEÇÃO “B”

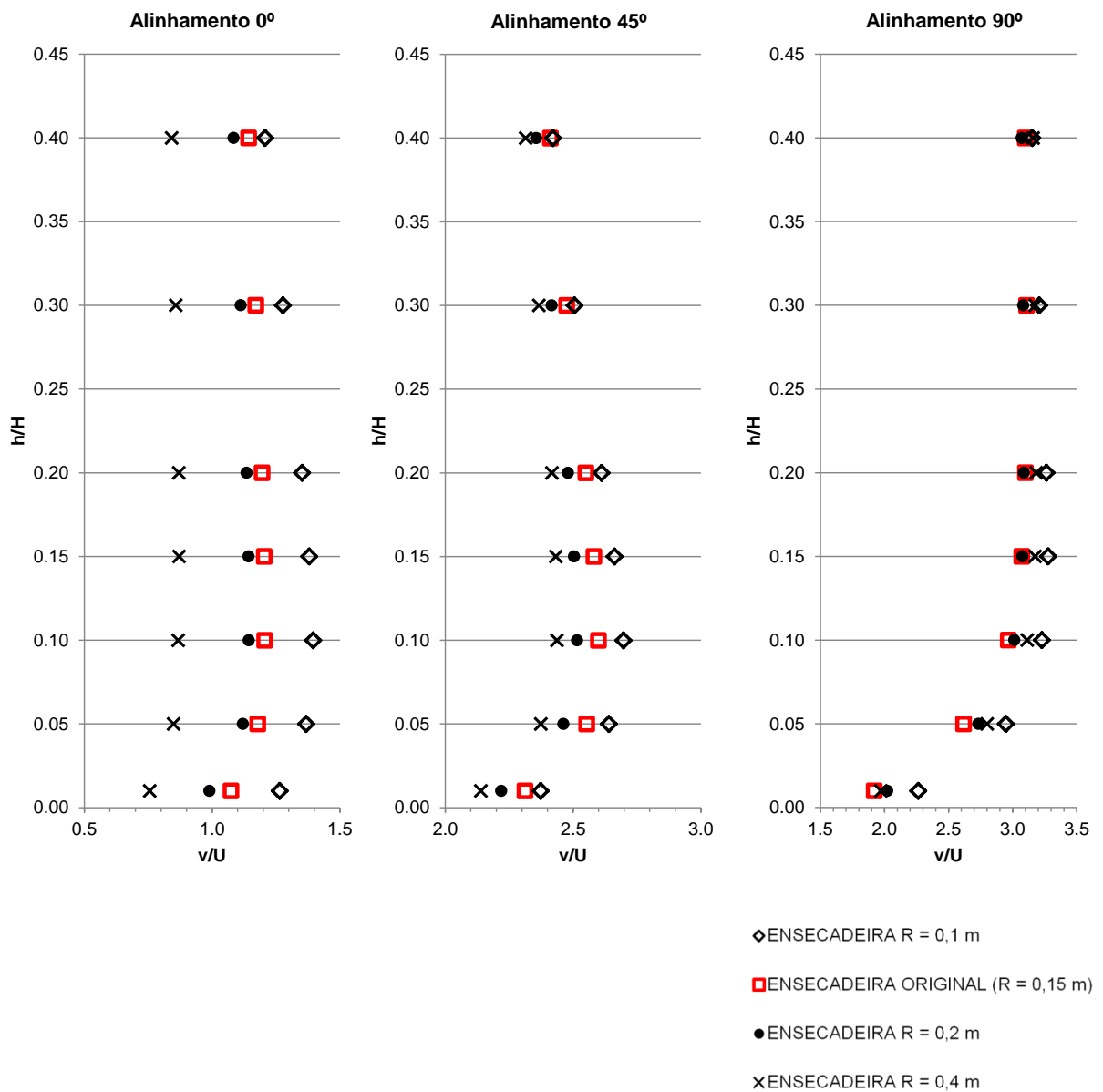


FIGURA 4.9 – VARIAÇÃO DA LARGURA DA CRISTA DA ENSECADEIRA  
 RELAÇÃO ( $v/U$ ) VERSUS ( $h/H$ ) – SEÇÃO “C”

Em termos de tensão tangencial, os resultados são obtidos de forma gráfica no modelo numérico adotado. Segue apresentado nas FIGURAS 4.10 a 4.13, na cor vermelha, para cada configuração geométrica de ensecadeira estudada, a região que apresenta os valores mais altos de tensão tangencial. Nestas Figuras as escalas indicam no valor máximo o valor máximo de tensão tangencial para cada caso. Observa-se que a região é a mesma para as três ensecadeiras simuladas, mas a variação do raio da ponta de aterro altera os valores máximos da tensão tangencial no local mais crítico.

Quanto maior o raio da ponta de aterro, menor o máximo valor de tensão tangencial isto porque também é maior o raio do escoamento na região da ponta de aterro. Se é maior o raio do escoamento na região da ponta de aterro, significa que mais suave e menos brusca é a interferência (contração) no escoamento causada pela obstrução da ponta de aterro no canal. Por isso há a consequente diminuição da tensão tangencial na região da ponta de aterro.

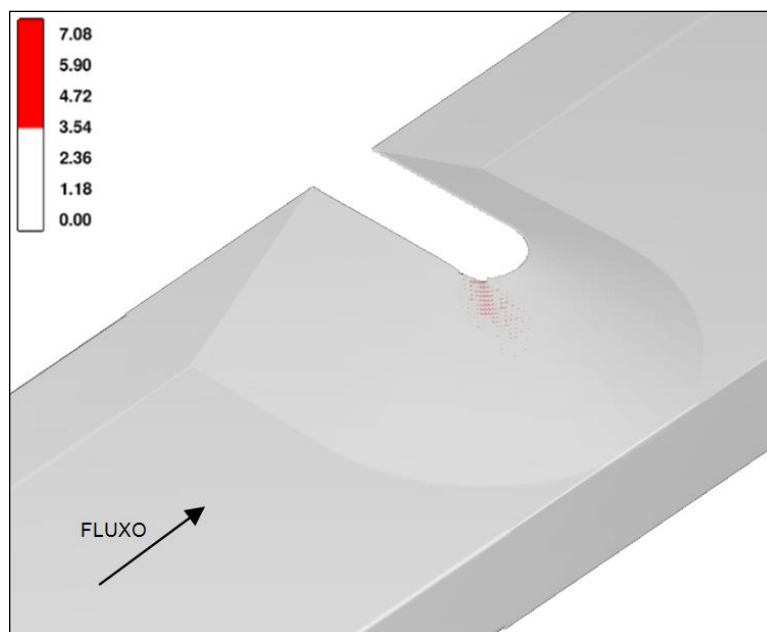


FIGURA 4.10 – ENSECADEIRA R = 0,1 m – TENSÃO TANGENCIAL (N/m²)

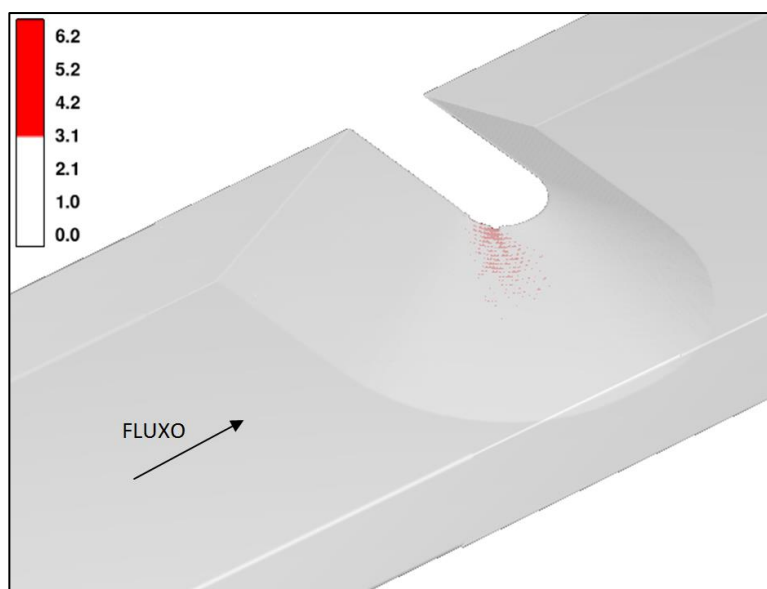
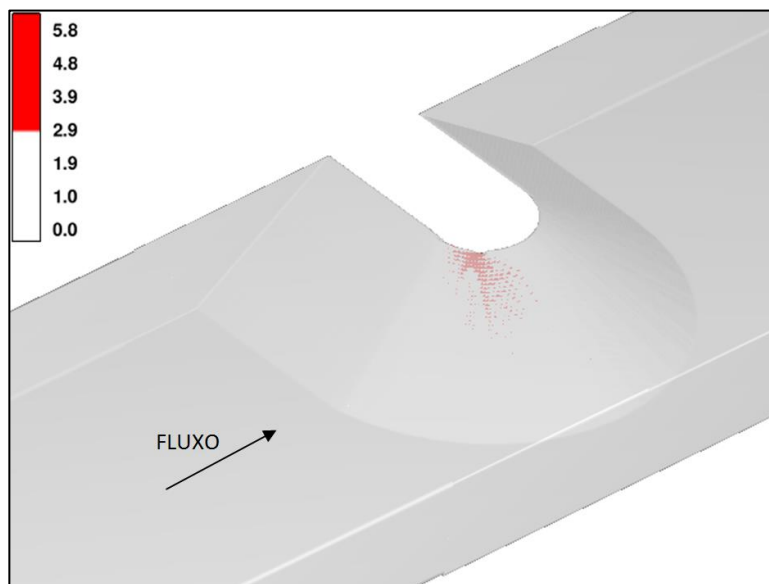
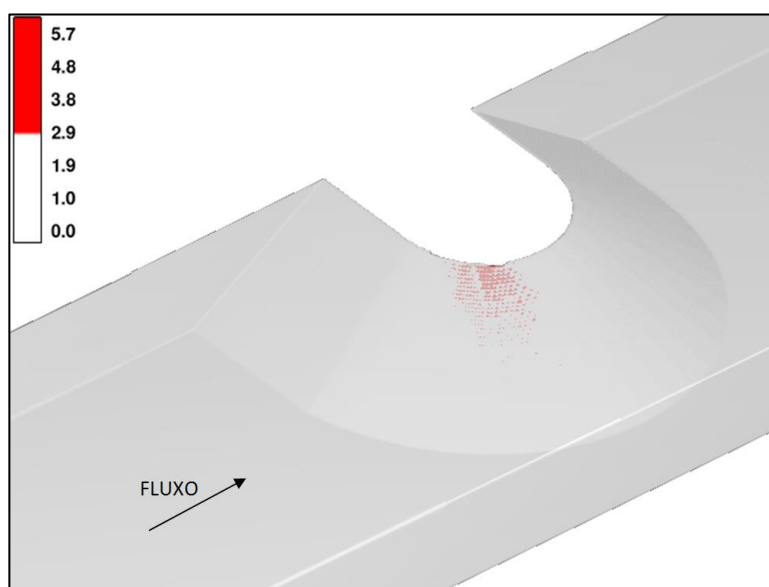


FIGURA 4.11 – ENSECADEIRA ORIGINAL (R = 0,15 m) – TENSÃO TANGENCIAL (N/m²)

FIGURA 4.12 – ENSECADEIRA  $R = 0,2\text{ m}$  – TENSÃO TANGENCIAL ( $N/m^2$ )FIGURA 4.13 – ENSECADEIRA  $R = 0,4\text{ m}$  – TENSÃO TANGENCIAL ( $N/m^2$ )

As FIGURAS 4.14 a 4.17 representam de forma gráfica também a tensão tangencial, porém nestas Figuras as escalas foram definidas iguais para todas as imagens. É possível identificar que a área afetada pela mesma faixa de valores da tensão tangencial representada pela cor vermelha diminui como o aumento do raio da ponta de aterro e conseqüente aumento do raio do escoamento na ponta de aterro.

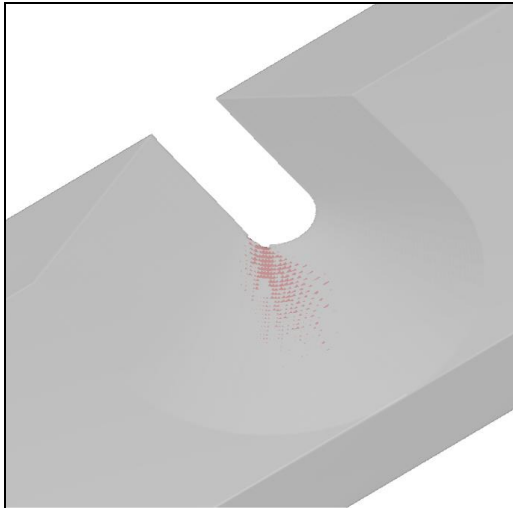


FIGURA 4.14 - ENSECADEIRA  
R = 0,1 m –  
TENSÃO TANGENCIAL (N/m<sup>2</sup>)

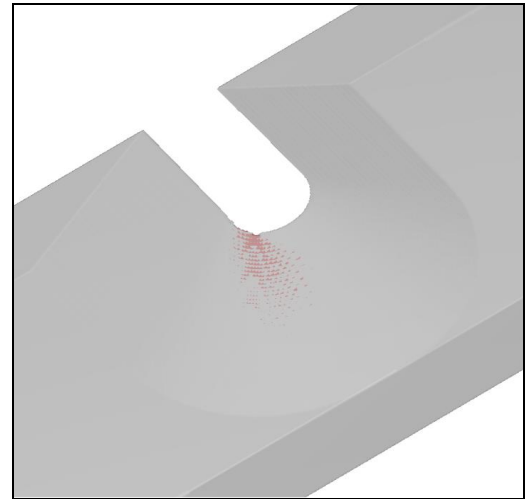


FIGURA 4.15 - ENSECADEIRA ORIGINAL  
(R = 0,15 m) –  
TENSÃO TANGENCIAL (N/m<sup>2</sup>)

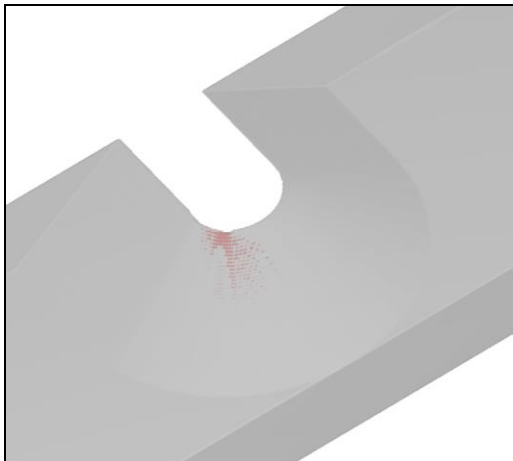


FIGURA 4.16 - ENSECADEIRA R = 0,2 m –  
TENSÃO TANGENCIAL (N/m<sup>2</sup>)

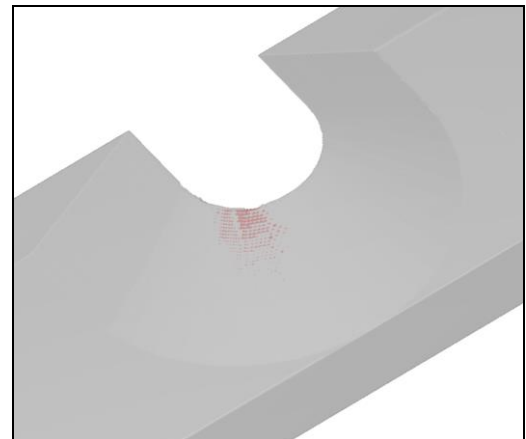


FIGURA 4.17 - ENSECADEIRA R = 0,4 m –  
TENSÃO TANGENCIAL (N/m<sup>2</sup>)

As figuras que são apresentadas na sequência indicam a partir de uma vista superior as linhas de corrente do escoamento e, em escala gráfica de cores, a velocidade do escoamento na superfície. O objetivo nessa representação não é observar com detalhe os resultados em termos de valores de velocidade, uma vez que essa avaliação já foi realizada, por isso as escalas das Figuras foram mantidas iguais para os três casos em estudo. O objetivo do formato apresentado é enfatizar a diferença da curvatura do escoamento e da distribuição de velocidades na ponta de aterro da ensecadeira em cada caso.

A análise das figuras permite constatar que a medida que há o aumento do raio da ponta de aterro da ensecadeira, há uma melhor distribuição das velocidades

na região da ponta de aterro, ou seja, na FIGURA 4.18, com o menor raio de ponta de aterro simulado, as velocidades mais altas estão concentradas em uma área pequena e há uma separação do escoamento mais abrupta a jusante da ponta de aterro se comparada com as simulações indicadas nas FIGURAS 4.19 a 4.21.

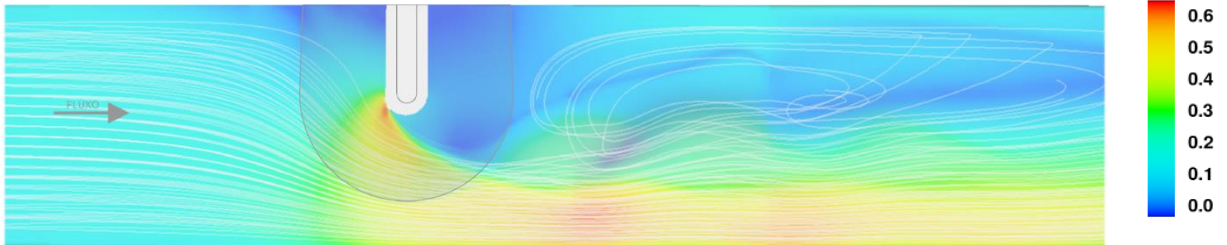


FIGURA 4.18 – ENSECADEIRA  $R = 0,1$  m – LINHAS DE CORRENTE E ESCALA GRÁFICA VELOCIDADE (m/s)

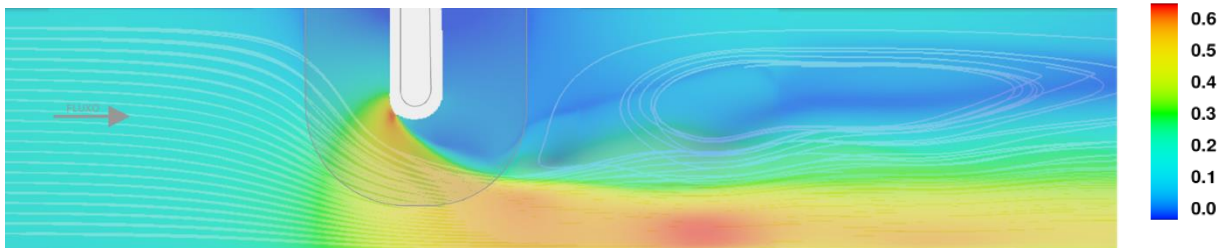


FIGURA 4.19 – ENSECADEIRA ORIGINAL ( $R = 0,15$  m) – LINHAS DE CORRENTE E ESCALA GRÁFICA VELOCIDADE (m/s)

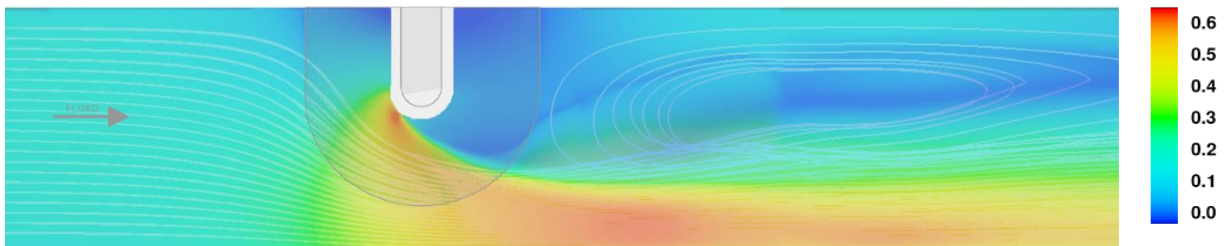


FIGURA 4.20 – ENSECADEIRA  $R = 0,2$  m – LINHAS DE CORRENTE E ESCALA GRÁFICA VELOCIDADE (m/s)

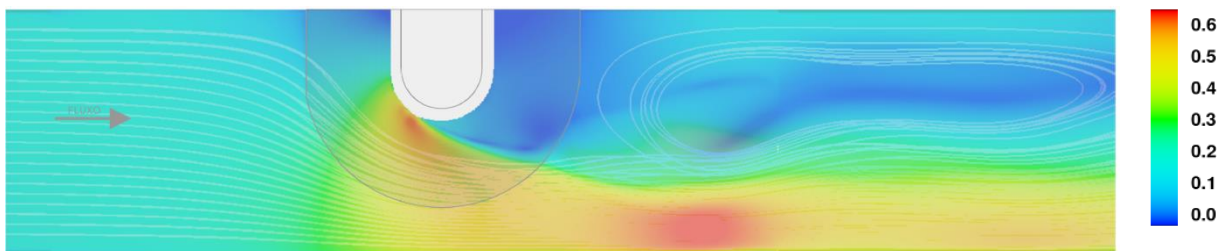


FIGURA 4.21 – ENSECADEIRA  $R = 0,4$  m – LINHAS DE CORRENTE E ESCALA GRÁFICA VELOCIDADE (m/s)

A comparação das quatro FIGURAS 4.18 a 4.21 aliada as conclusões já obtidas com relação às velocidades na região da ponta de aterro das ensecadeiras estudadas, permite concluir que o aumento do raio da ponta de aterro provoca uma melhor distribuição das velocidades na região da ponta de aterro que está associada, de maneira geral, a uma diminuição dos valores registrados de velocidade nessa região.

A FIGURA 4.22 compara as linhas de corrente traçadas na camada mais superficial do escoamento e mais próximas das ensecadeiras simuladas. Observa-se a alteração da curvatura com que o escoamento passa pela brecha provocada pela obstrução da ensecadeira de acordo com a variação do raio da ponta de aterro. Quanto maior o raio da ponta de aterro, maior o raio de curvatura do escoamento na ponta de aterro. Fica evidente na FIGURA 4.22 o maior raio do escoamento na região da ponta de aterro da “ENSECADEIRA R = 0,4 m” se comparada com a “ENSECADEIRA R = 0,1 m”.

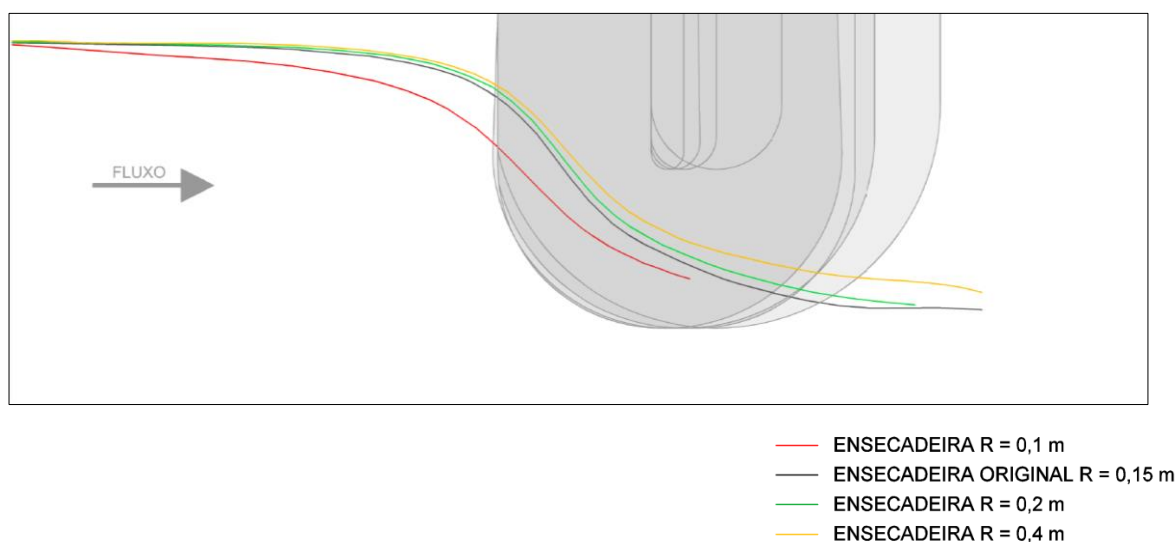


FIGURA 4.22 – COMPARAÇÃO LINHA DE CORRENTE DAS ENSECADEIRAS SIMULADAS

### 4.3 VARIAÇÃO DA INCLINAÇÃO DO TALUDE DA ENSECADEIRA

Os resultados numéricos da segunda etapa de estudos considerando a variação da inclinação do talude da ensecadeira são apresentados no APÊNDICE 3.

Compararam-se os resultados das duas configurações de ensecadeira simuladas:

- 1) Ensecadeira original: nome dado à simulação numérica que consiste na reprodução da investigação experimental de Pereira (2001), com a inclinação do talude da ensecadeira de  $34^\circ$ ;
- 2) Ensecadeira Talude  $25^\circ$ : nome dado à simulação considerando a inclinação do talude da ensecadeira igual a  $25^\circ$ .

As FIGURAS 4.23, 4.24 e 4.25 indicam, para as três seções de medição, “A”, “B” e “C”, nos três alinhamentos da ensecadeira, a comparação dos resultados da simulação numérica das duas configurações geométricas da inclinação do talude da ensecadeira.

A apresentação gráfica dos resultados feita na sequência permite identificar a mesma tendência nas três seções (“A”, “B” e “C”): para o Alinhamento  $0^\circ$  e  $45^\circ$  há diminuição evidente nas velocidades medidas na ponta de aterro considerando o talude menos íngreme. Para o Alinhamento de  $90^\circ$ , a variação das velocidades é pequena. Estas tendências podem ser descritas com mais detalhe conforme segue:

- Para o Alinhamento  $0^\circ$ , nas três seções de registro de velocidades, houve diminuição das velocidades registradas na ponta de aterro da ensecadeira com talude  $25^\circ$  se comparada às velocidades registradas na ponta de aterro da ensecadeira com talude  $34^\circ$ . De maneira geral esta diminuição foi da ordem de 20% atingindo, na seção “C”, valores de velocidade da ordem de 30% a 50% menores do que os registrados na ensecadeira original (talude  $34^\circ$ );
- Para o Alinhamento  $45^\circ$ , nas três seções de registro de velocidades, também houve diminuição das velocidades registradas na ponta de aterro da ensecadeira com talude  $25^\circ$  se comparada às velocidades registradas na ponta de aterro da ensecadeira original (talude  $34^\circ$ ). De maneira geral esta diminuição foi da ordem de 20% atingindo, na seção “C”, valores de velocidade da ordem de 30% menores do que os registrados na ensecadeira original (talude  $34^\circ$ );
- Para as velocidades registradas no Alinhamento  $90^\circ$ , as diferenças entre velocidades na região da ponta de aterro da ensecadeira com talude  $25^\circ$  e na ponta de aterro da ensecadeira original (talude  $34^\circ$ ) de maneira geral não passaram de 6%. Sendo que nesta seção embora a maioria dos registros de velocidade indicaram diminuição da velocidade com a diminuição da inclinação do talude, alguns registros indicaram aumento da velocidade, de maneira pontual esta diferença atingiu 13% no ponto mais próximo da ensecadeira na seção “A”. Assim, de maneira comparativa

com o comportamento observado nos Alinhamentos  $0^\circ$  e  $45^\circ$  conclui-se que no Alinhamento  $0^\circ$  não houve variação importante nas velocidades registradas nas duas alternativas simuladas (talude da ensecadeira de  $35^\circ$  e talude da ensecadeira de  $25^\circ$ ).

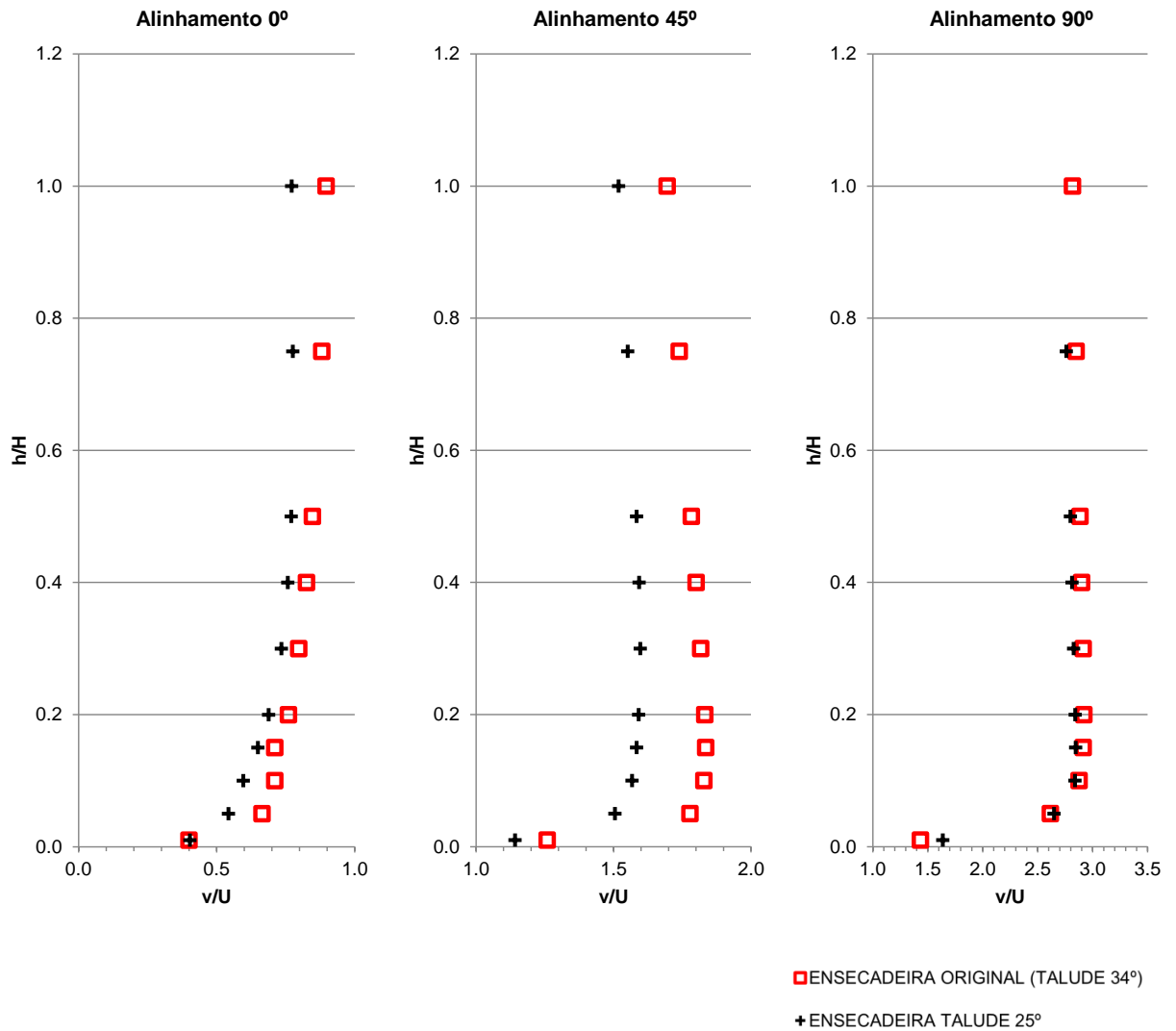


FIGURA 4.23 – VARIÇÃO DA INCLINAÇÃO DO TALUDE DA ENSECADEIRA  
 RELAÇÃO (v/U) VERSUS (h/H) – SEÇÃO "A"

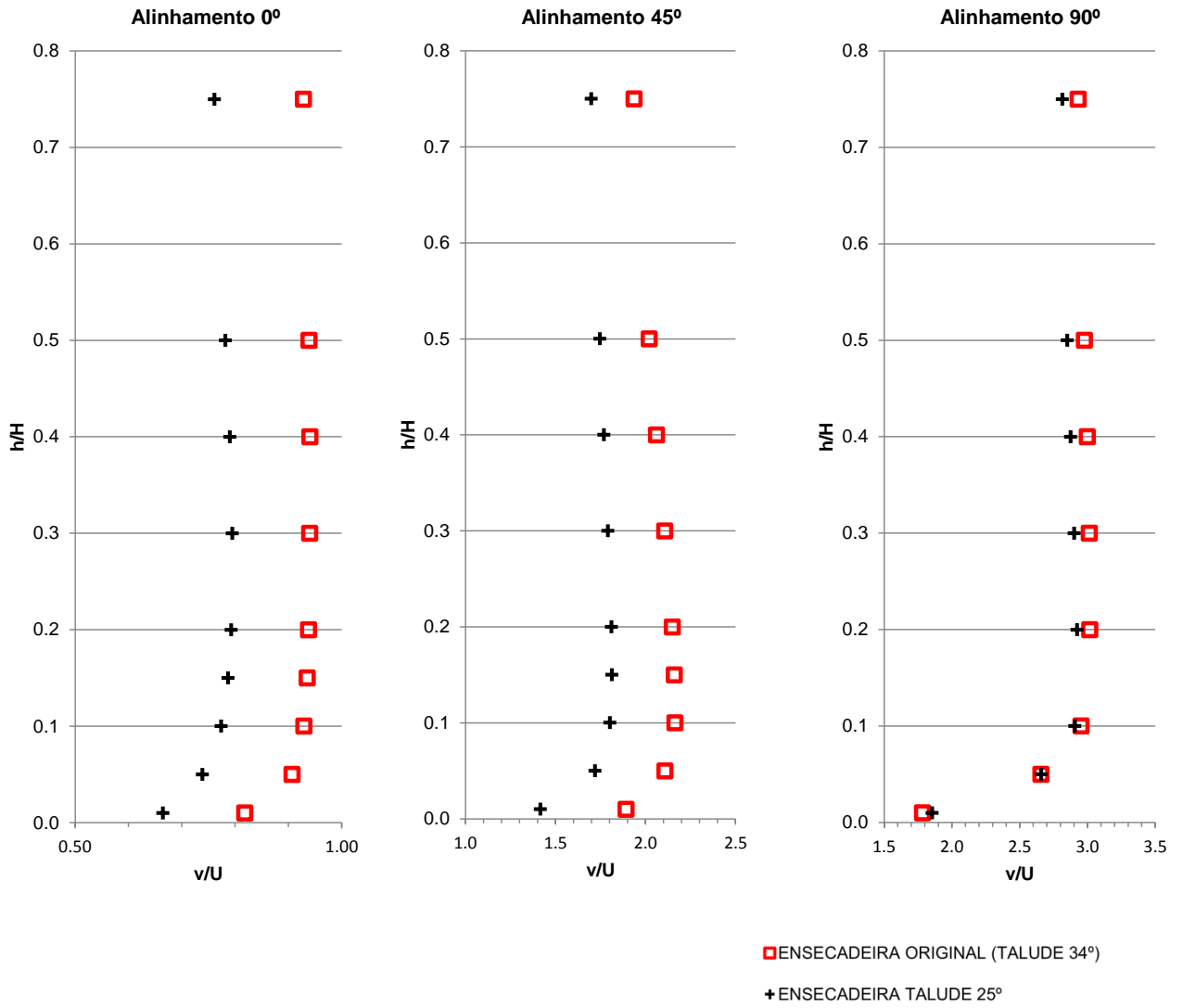


FIGURA 4.24 – VARIÇÃO DA INCLINAÇÃO DO TALUDE DA ENSECADEIRA  
 RELAÇÃO ( $v/U$ ) VERSUS ( $h/H$ ) – SEÇÃO “B”

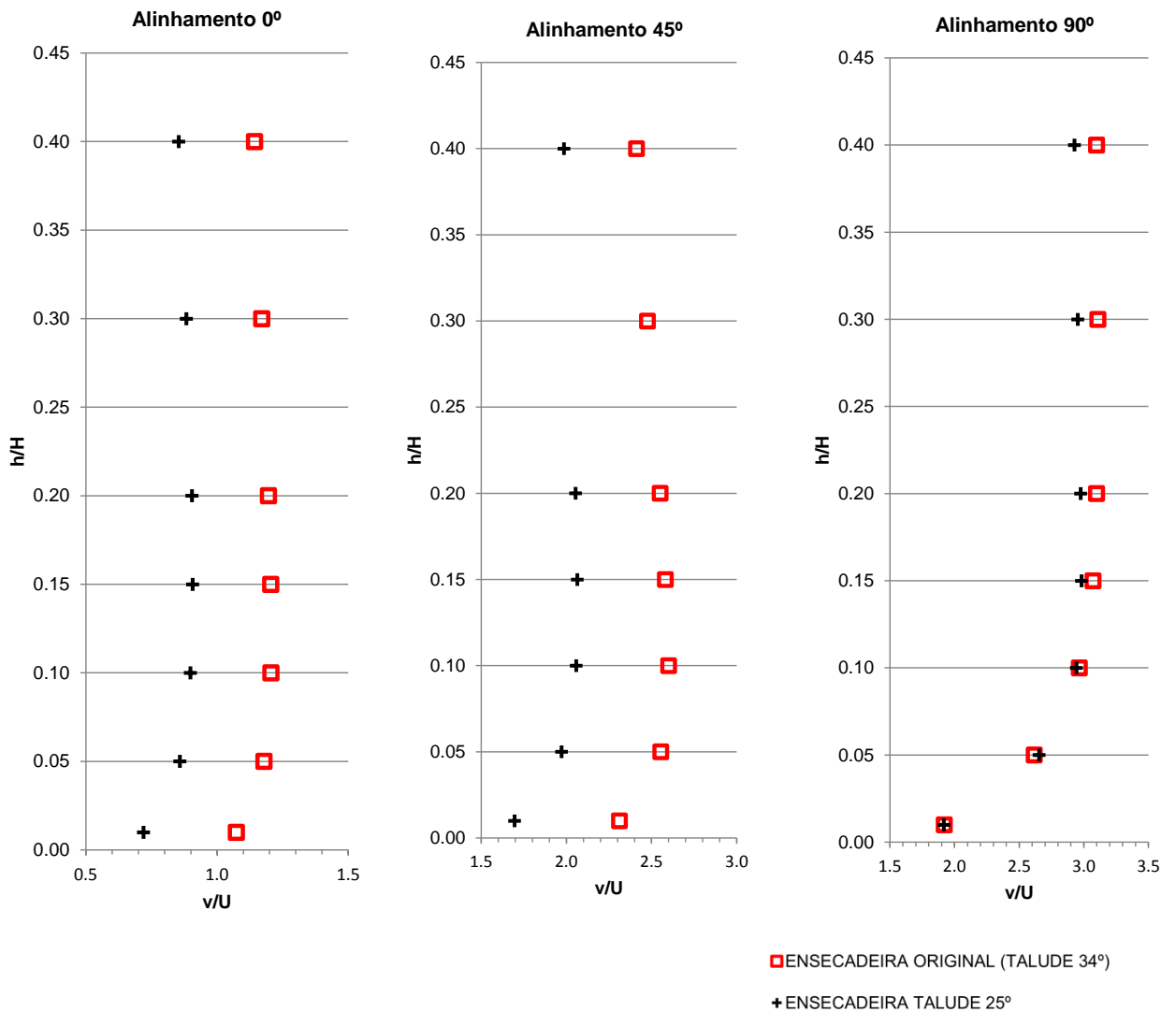


FIGURA 4.25 – VARIÇÃO DA INCLINAÇÃO DO TALUDE DA ENSECADEIRA  
 RELAÇÃO ( $v/U$ ) VERSUS ( $h/H$ ) – SEÇÃO “C”

Em termos de tensão tangencial, os resultados foram obtidos de forma gráfica no modelo numérico adotado conforme FIGURAS 4.26 e 4.27. Tais figuras indicam a região na enseadeira que apresenta os valores mais altos de tensão tangencial na cor vermelha. Observa-se que a região é a mesma para as duas enseadeiras comparadas, mas a variação da inclinação do talude da enseadeira altera os valores da tensão tangencial no local mais crítico. Para o talude menos inclinado, talude de 25°, há uma diminuição na tensão tangencial em comparação à enseadeira original, com talude mais íngreme.

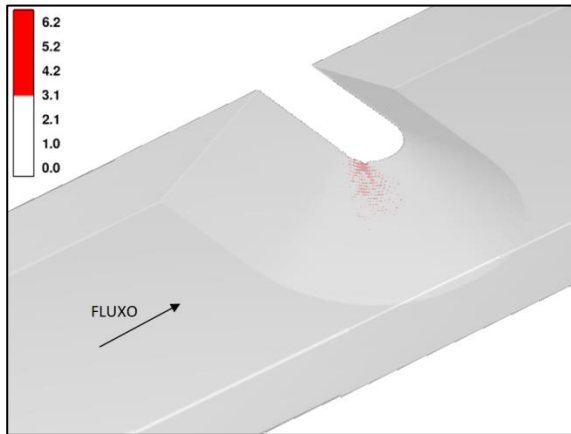


FIGURA 4.26 – ENSECADEIRA ORIGINAL (TALUDE 34°) – TENSÃO TANGENCIAL (N/m<sup>2</sup>)

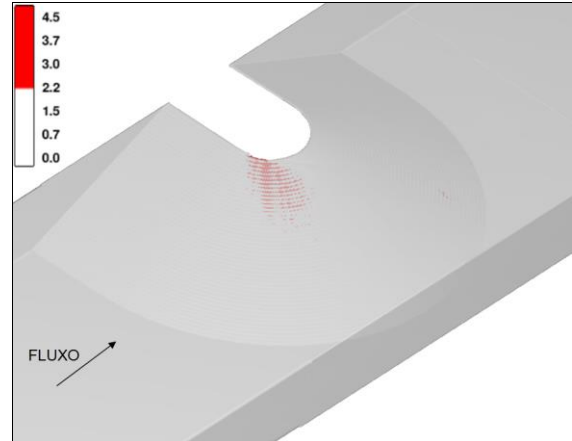


FIGURA 4.27 – ENSECADEIRA TALUDE 25° – TENSÃO TANGENCIAL (N/m<sup>2</sup>)

As FIGURAS 4.28 e 4.29 representam de forma gráfica também a tensão tangencial, porém para facilitar a comparação entre as figuras as escalas foram definidas iguais para os dois casos. É possível identificar que a área afetada pela mesma faixa de valores da tensão tangencial representada pela cor vermelha diminui como a diminuição da inclinação do talude (de 34° para 25°).

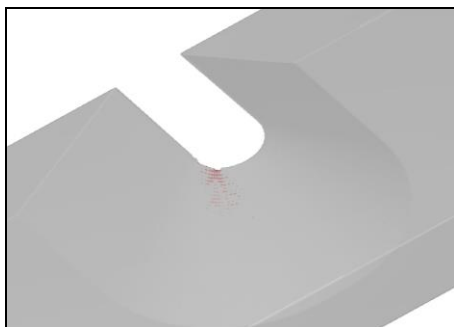


FIGURA 4.28 – ENSECADEIRA ORIGINAL (TALUDE 34°) – TENSÃO TANGENCIAL (N/m<sup>2</sup>)



FIGURA 4.29 – ENSECADEIRA TALUDE 25° – TENSÃO TANGENCIAL (N/m<sup>2</sup>)

As figuras que são apresentadas na sequência indicam as linhas de corrente do escoamento e em escala gráfica de cores a velocidade do escoamento na superfície. O objetivo nessa apresentação não é observar no detalhe os resultados em termos de valores de velocidade, uma vez que essa avaliação já foi realizada, por isso as escalas foram mantidas iguais para os dois casos de estudo comparados. O objetivo do formato apresentado é enfatizar a diferença da curvatura do escoamento e da distribuição de velocidades na ponta de aterro da ensecadeira em cada caso.

Àvaliando-se as FIGURAS 4.30 e 4.31 fica evidente que as velocidades na ponta de aterro da ensecadeira com inclinação do talude de  $25^\circ$  são menores em comparação com a ensecadeira original, com talude com inclinação de  $34^\circ$ .

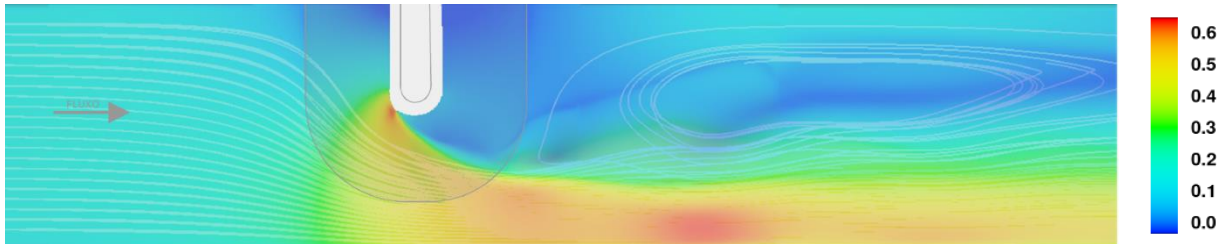


FIGURA 4.30 – ENSECADEIRA ORIGINAL (TALUDE  $34^\circ$ ) – LINHAS DE CORRENTE E ESCALA GRÁFICA VELOCIDADE (m/s)

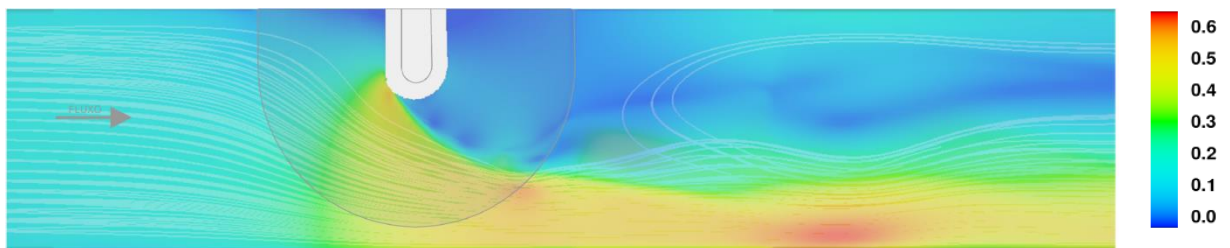


FIGURA 4.31 – ENSECADEIRA TALUDE  $25^\circ$  – LINHAS DE CORRENTE E ESCALA GRÁFICA VELOCIDADE (m/s)

A FIGURA 4.32 compara as linhas de corrente traçadas na camada mais superficial do escoamento nas proximidades das ensecadeiras simuladas para o caso de alteração da inclinação do talude. É possível observar que a diminuição da inclinação do talude da ensecadeira provoca alteração da curvatura do escoamento na região da brecha no entorno da ensecadeira. A menor inclinação do talude resultou em maior raio de curvatura do escoamento.

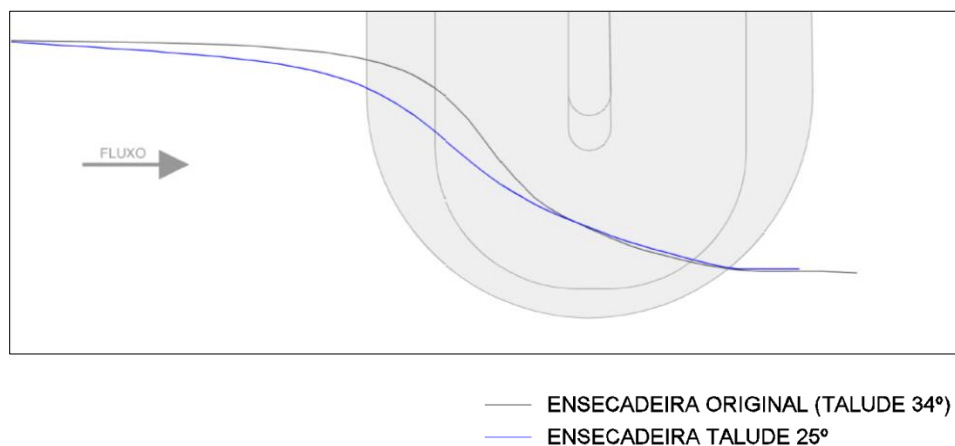


FIGURA 4.32 – COMPARAÇÃO DAS LINHAS DE CORRENTE DAS ENSECADEIRAS SIMULADAS (MAIS SUPERFICIAL E MAIS PRÓXIMA DA ENSECADEIRA)

A análise dos resultados apresentados indica que quanto maior o raio de curvatura do escoamento na ponta de aterro, menor a velocidade e a tensão tangencial incidentes na ponta de aterro. Isso porque se é maior o raio do escoamento na região da ponta de aterro, mais suave e menos brusca é a interferência (contração) no escoamento causada pela obstrução da ponta de aterro no canal.

#### 4.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este subitem tem o objetivo de apresentar de maneira sucinta os principais resultados e análises de resultados deste trabalho de pesquisa.

A primeira etapa de estudos, composta pela simulação numérica, reprodução da investigação experimental, permitiu as conclusões e observações principais apresentadas na sequência:

- As malhas de elementos adotadas em série para as simulações numéricas se mostraram adequadas. A observação dos dados obtidos ao longo das três simulações indica maior semelhança dos resultados em modelo numérico aos resultados da investigação experimental ao longo das simulações, o que justifica a maior densidade da malha na região da ensecadeira e o custo computacional inerente a esta densificação;
- Os perfis de velocidade das simulações numéricas indicam semelhança entre a investigação experimental realizada em modelo físico e as simulações

realizadas no modelo numérico. Para a maioria dos pontos de registro de velocidade (80%), o modelo numérico apresentou resultados de velocidade com diferença máxima de 10% em relação ao modelo físico. De maneira geral o modelo numérico apresentou resultados de velocidade menores do que o modelo físico;

- A maior diferença entre os resultados do modelo físico e do modelo numérico ocorreu no Alinhamento 0<sup>o</sup> da Seção A no ponto mais próximo da ensecadeira. Outras diferenças pontuais de menor grandeza também podem ser identificadas. De maneira geral, observando as FIGURAS 4.1, 4.2 e 4.3 que apresentam o comportamento do perfil de velocidade adimensionalizado nas diversas Seções na região da ensecadeira, diversas diferenças indicam uma alteração pontual da tendência esperada do comportamento do perfil de velocidade no resultado do modelo físico. Isto pode indicar um equívoco no registro de velocidade no modelo físico, pois alguns registros de velocidade feitos no modelo físico parecem estar fora da tendência indicada de maneira geral pelos perfis de velocidade. E isto pode ser resultado da dificuldade de medição devido à utilização do tubo de Pitot-Prandtl para registro de velocidades no modelo físico. Pereira (2001) comenta sobre o fato dos registros de velocidade através deste equipamento ser bastante trabalhosa e cita a grande dificuldade de realizar os registros de velocidade no Alinhamento 0<sup>o</sup> devido à instabilidade das linhas de corrente do escoamento nessa seção;
- Apesar dos resultados da simulação final correspondente à malha final adotada serem considerados satisfatórios para o estudo proposto, com fins exploratórios foi realizada a tentativa de densificar ainda mais a malha na região da ensecadeira. Entretanto, a demanda computacional dessa simulação não permitiu que de fato ela fosse concluída. Sendo assim, muito embora os resultados da simulação numérica se apresentem semelhantes aos resultados da investigação experimental e ainda as simulações não tenham apresentado alterações significativas importantes no comportamento do escoamento, não foi possível chegar de fato no limite da simulação que permitisse concluir que os resultados são independentes da malha adotada;
- Sabendo que o modelo físico carrega distorções e simplificações relacionadas ao trabalho humano da leitura dos parâmetros e que o modelo numérico

também carrega distorções devido às simplificações inerentes às simulações numéricas, não havia a pretensão de que os resultados de ambos os modelos resultassem idênticos. A partir das análises realizadas dos resultados em modelo numérico em comparação aos resultados disponíveis dos ensaios em modelo físico, e considerando também as limitações citadas, entende-se que o modelo numérico adotado consegue reproduzir de forma adequada e satisfatória a situação estudada na investigação experimental de Pereira (2001).

A partir dessa conclusão foi possível iniciar a segunda etapa dos estudos numéricos que, considerando os mesmos critérios e premissas das simulações da primeira etapa (malha de elementos, condições de contorno, condição inicial, etc.), compreendeu a alteração de dois parâmetros da geometria da ensecadeira: 1) largura da crista (e raio da ponta de aterro); e 2) inclinação do talude. Estas alterações foram realizadas sem alterar a área e, portanto, velocidade média da brecha da ensecadeira. Estas simulações tiveram o objetivo de entender como a curvatura do escoamento afeta as condições do escoamento na região da ponta de aterro.

A alteração da largura da crista da ensecadeira foi feita em três alternativas adicionais à simulação já realizada da ensecadeira original com raio da ponta de aterro de 0,15 metros, são elas: ensecadeira com raio da ponta de aterro de 0,10 m (e, portanto largura da crista de 0,20 m), ensecadeira com raio da ponta de aterro de 0,20 m (e, portanto largura da crista de 0,40 m) e ensecadeira com raio da ponta de aterro de 0,40 m (e, portanto largura da crista de 0,80 m). A comparação dos resultados das simulações destas quatro configurações permitiu as conclusões e observações principais apresentadas na sequência:

- O aumento da largura da crista da ensecadeira e como consequência, do raio da ponta de aterro, influencia a velocidade e tensão tangencial nessa região;
- A variação das velocidades na região da ponta de aterro para as alternativas estudadas é mais acentuada no Alinhamento 0° do que nos Alinhamentos 45° e 90°;

- Para o Alinhamento  $0^\circ$ , a diminuição do raio da ponta de aterro (de  $R = 0,15$  m para  $R = 0,1$  m) resultou em aumento da ordem de até 20% na velocidade do escoamento;
- Com relação ao aumento do raio da ponta de aterro a partir da Ensecadeira Original ( $R = 0,15$  m) para  $R = 0,2$  m e  $R = 0,4$  m há uma diminuição das velocidades na região da ponta de aterro de até 8% para o  $R = 0,2$  m em comparação com a ensecadeira original e da ordem de 30% para a ensecadeira com raio de ponta de aterro  $R = 0,4$  m em comparação com a ensecadeira original ( $R = 0,15$  m);
- A análise das linhas de corrente do escoamento para as quatro configurações estudadas e também a análise gráfica das velocidades nessa região indicam uma maior concentração das velocidades em uma menor área na ponta de aterro quanto menor o seu raio. Este efeito é consequência da curvatura do escoamento na região da ponta de aterro que é menor quanto menor o raio da ponta de aterro. Quanto menor o raio de curvatura do escoamento na região da ponta de aterro, mais abrupta é a separação do escoamento a jusante da obstrução causada pela ponta de aterro;
- A análise das linhas de corrente do escoamento para as configurações estudadas e também a análise gráfica das velocidades nessa região aliada aos valores de velocidade registrados nos diversos pontos definidos nas quatro ensecadeiras estudadas considerando a variação do raio na ponta de aterro permitiu concluir que a melhor distribuição das velocidades da ponta de aterro está associada, de maneira geral, a uma diminuição das velocidades nessa região, tudo isso em decorrência do aumento do raio da ponta de aterro que provoca alteração da curvatura do escoamento nessa região;
- A comparação das linhas de corrente das quatro diferentes configurações de raio de ponta de aterro estudadas evidenciam a alteração da curvatura do escoamento na região da brecha com a alteração do raio da ponta de aterro. Sendo que quanto maior o raio da ponta de aterro, maior também o raio de curvatura do escoamento na região da ponta de aterro;
- Quanto maior o raio de curvatura do escoamento na ponta de aterro, mais suave e menos brusca é a interferência (contração) no escoamento causada pela obstrução da ponta de aterro no canal. Em consequência deste

comportamento do escoamento, resultam menores os valores de velocidade e de tensão tangencial incidentes na ponta de aterro.

As simulações considerando a alteração da inclinação do talude da enseadeira original com  $34^\circ$  para a alternativa simulada com  $25^\circ$  mantendo a área, e, portanto, a velocidade média na brecha permitiu as conclusões e observações principais apresentadas na sequência:

- A análise dos resultados obtidos de velocidade e tensão tangencial indica de maneira geral a diminuição dos dois parâmetros com a diminuição da inclinação do talude da enseadeira (de  $34^\circ$  para  $25^\circ$ );
- A diminuição das velocidades é mais significativa nos Alinhamentos  $0^\circ$  e  $45^\circ$ . Nestes alinhamentos a diminuição das velocidades nos pontos registrados resultou maior na seção “C”, mais próxima da superfície, da ordem de 20% atingindo até 50% para o Alinhamento  $0^\circ$  e da ordem de 30% na mesma seção para o Alinhamento  $45^\circ$ ;
- Para o Alinhamento  $90^\circ$  a conclusão é que não houve alteração significativa nas velocidades registradas considerando alteração do talude da enseadeira. Isto pode ser explicado pela pequena alteração ou alteração inexistente na linha de corrente especificamente na região do Alinhamento  $90^\circ$  para as duas configurações de talude estudadas (ver FIGURA 4.32).
- Há alteração evidente no raio de curvatura do escoamento na região da ponta de aterro considerando a variação da inclinação do talude da enseadeira. Esta alteração da curvatura do escoamento é mais importante a montante da brecha da enseadeira nos Alinhamentos  $0^\circ$  e  $45^\circ$ ;
- O maior raio de curvatura do escoamento na região da ponta de aterro significa, de maneira prática, interferência mais suave e menos brusca no escoamento causada pela obstrução do canal pela ponta de aterro. Conclui-se que este efeito resultou em menores velocidades e tensão tangencial na ponta de aterro;
- O efeito na curvatura do escoamento ocasionado pela variação da inclinação do talude parece explicar a diferença encontrada entre os resultados de modelo hidráulico reduzido e a tendência de resultado no protótipo indicada na FIGURA 2.29 com relação à velocidade na ponta de aterro. Isso porque o

material utilizado em protótipo possui um ângulo de repouso que é resultado de suas dimensões, enquanto o material que o representa em modelo hidráulico reduzido, pelo fato de ter dimensão menor, possui ângulo de repouso menor. Conforme foi comprovado através desta pesquisa, se alterarmos única e exclusivamente a inclinação do talude da ensecadeira, mesmo considerando uma mesma área e velocidade média na brecha, as velocidades e tensão tangencial nas proximidades da ponta de aterro resultarão menores quanto menor a inclinação do talude da ensecadeira. Isto se justifica pela alteração da curvatura do escoamento na ponta de aterro consequência da única alteração realizada na simulação: a inclinação do talude da ensecadeira. Portanto, a tendência dos ensaios em modelo reduzido resultarem em subdimensionamento do material a ser empregado no fechamento em protótipo quanto menor a sua dimensão, pode ser explicada pelo efeito da inclinação do talude que é consequência do ângulo de repouso do material utilizado em modelo hidráulico reduzido.

## 5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este trabalho teve como objetivo geral o estudo do escoamento considerando fechamento do rio em ponta de aterro. Com os objetivos específicos, pretendeu-se avaliar se o modelo numérico adotado para este estudo é capaz de simular de maneira adequada o escoamento em um canal obstruído parcialmente por uma ensecadeira, e identificar como a curvatura do escoamento afeta as condições do escoamento na ponta de aterro.

A primeira etapa de estudos, composta pela simulação numérica reprodução da investigação experimental realizada em modelo físico por Pereira (2001), permitiu concluir que o modelo numérico adotado consegue reproduzir de forma adequada e satisfatória a situação estudada. Esta conclusão baseou-se na análise das velocidades e dos perfis de velocidade adimensionalizados resultantes das simulações numéricas que indicam semelhança entre a investigação experimental realizada em modelo físico e as simulações realizadas no modelo numérico.

A partir dessa conclusão foi possível iniciar a segunda etapa dos estudos numéricos que, considerando os mesmos critérios e premissas das simulações da primeira etapa (malha de elementos, condições de contorno, condição inicial, etc.), compreendeu a alteração de dois parâmetros da geometria da ensecadeira: 1) largura da crista (e raio da ponta de aterro); e 2) inclinação do talude. Estas alterações foram realizadas sem alterar a área e, portanto, velocidade média na brecha da ensecadeira. Estas simulações tiveram o objetivo de entender como a curvatura do escoamento afeta as condições do escoamento na região da ponta de aterro.

A alteração da largura da crista da ensecadeira foi feita em três alternativas adicionais à simulação já realizada da ensecadeira original com raio da ponta de aterro de 0,15 metros, são elas: ensecadeira com raio da ponta de aterro de 0,10 m (e, portanto largura da crista de 0,20 m), ensecadeira com raio da ponta de aterro de 0,20 m (e, portanto largura da crista de 0,40 m) e ensecadeira com raio da ponta de aterro de 0,40 m (e, portanto largura da crista de 0,80 m). A comparação dos resultados das simulações destas quatro configurações permitiu concluir que o aumento da largura da crista da ensecadeira e como consequência, do raio da ponta de aterro, afeta as condições do escoamento na ponta de aterro. Este efeito foi

avaliado em termos de velocidade e tensão tangencial nessa região. Quanto maior a largura da crista da ensecadeira e, portanto, raio da ponta de aterro, maior também o raio de curvatura do escoamento na ponta de aterro, e assim mais suave e menos brusca é a interferência (contração) no escoamento causada pela obstrução da ponta de aterro no canal. Em consequência deste comportamento do escoamento, resultam menores os valores de velocidade e de tensão tangencial na ponta de aterro.

As simulações considerando a alteração da inclinação do talude da ensecadeira original com 34° para a alternativa simulada com 25° permitiu concluir que, de maneira geral, há diminuição da velocidade e da tensão tangencial com a diminuição da inclinação do talude da ensecadeira (de 34° para 25°). Há alteração evidente no raio de curvatura do escoamento na região da ponta de aterro considerando a variação da inclinação do talude da ensecadeira. O maior raio de curvatura do escoamento na região da ponta de aterro significa, de maneira prática, interferência mais suave e menos brusca no escoamento causada pela obstrução do canal pela ponta de aterro. Conclui-se que este efeito resultou em menores velocidades e tensão tangencial na ponta de aterro.

A partir deste trabalho, foi possível validar a utilização do modelo numérico adotado, o FLOW 3D®, para o estudo de canais obstruídos parcialmente por ensecadeiras, o estudo de fechamento de rios. Recomenda-se para próximos estudos a aplicação do mesmo modelo numérico para a simulação de casos de fechamento de rios em obras com a consideração da topografia e condições locais.

Essa conclusão deverá auxiliar os projetistas nas avaliações, resoluções de dificuldades e definições de projeto de fechamento de rios. Em casos nos quais o projetista tem a oportunidade de verificar no modelo reduzido as definições de projeto, o modelo numérico auxilia na definição e maior conhecimento das alternativas que serão testadas em modelo reduzido contribuindo assim para a otimização do projeto e do tempo de estudo. Para os casos nos quais o projetista não tem a oportunidade de fazer testes em modelo reduzido, o modelo numérico apresenta-se como uma ferramenta que auxilia e consolida as definições de projeto contribuindo para a diminuição das incertezas das definições puramente teóricas.

Com relação à variação da geometria da ensecadeira de fechamento, conclui-se que o aumento do raio da ponta de aterro da ensecadeira, bem como a diminuição da inclinação do talude acabaram por afetar a curvatura do escoamento

na ponta de aterro o que contribuiu para a diminuição da velocidade e tensão tangencial nessa região. Estes artifícios poderão ser empregados como solução de projeto e de obra com o objetivo de auxiliar em processos complexos de fechamento de rio. Especificamente com relação ao estudo da variação da inclinação do talude da enseadeira em ponta de aterro, os resultados obtidos dão um indicativo que pode explicar um efeito de escala inerente aos estudos em modelo físico. Isto porque o material empregado nos estudos em modelo reduzido tem dimensões menores (escala do modelo físico) do que o material empregado no fechamento do rio no protótipo e, por isso, o ângulo de repouso dos materiais e consequentemente inclinação do talude serão diferentes. Com relação a este aspecto, os estudos desta dissertação parecem explicar a tendência dos ensaios em modelo reduzido resultarem em subdimensionamento do material a ser empregado no fechamento em protótipo quanto menor a sua dimensão.

Recomenda-se a continuidade dos estudos de alteração da geometria na ponta de aterro considerando outras configurações de raios de ponta de aterro e inclinação do talude com o objetivo de complementar os conhecimentos resultantes deste trabalho de pesquisa inclusive considerando casos reais de fechamentos de rios com suas condições e especificidades.

Por fim, os estudos deste trabalho contribuirão para o melhor conhecimento do escoamento durante o fechamento do rio através do método ponta de aterro. Estes conhecimentos devem auxiliar em soluções de projeto e execução de enseadeiras de enrocamento para o fechamento de rios. Com relação à modelagem numérica, esta é uma ferramenta que vem sendo cada vez mais utilizada nas diversas questões da engenharia com o objetivo de diminuir as incertezas e solucionar problemas. Neste sentido, este trabalho também contribuiu para validar e incentivar o uso de modelos numéricos para sanar dúvidas e definir projetos de engenharia.

## REFERÊNCIAS

AGENCIA ESTADUAL DE NOTÍCIAS. Disponível em <<http://www.aen.pr.gov.br/>>. Acesso em: 22/11/2014.

BIRD, R. B.; STEWART, W. E.; LIGHTFOOT, E. N. **Transport Phenomena**. 2. ed. John Wiley & Sons, 2002.

BLANCHET, Ch. **Formation et destruction par un courant d'eau de massifs en pierres**. La Houille Blanche, p. 141-151. Março 1946.

BOUVARD, M. **Barrages mobiles et prises d'eau en rivière**. Paris: Eyrolles. 1960.

CARSON, M. A., GRIFFITHS, G. A. **Tractive stress and the onset of bed particle movement in gravel stream channels: different equations for different purposes**. Journal of the Hydrology. v. 79, n. 3/4, p. 375-388, Julho, 1985.

CENTRO DE HIDRÁULICA E HIDROLOGIA PROFESSOR PARIGOT DE SOUZA - CEHPAR. **Projeto HL-46: Estudos em Modelo Reduzido para o Aproveitamento Hidrelétrico do Rio Paraná, em Itaipu**. Comunicação nº 10. Estudo do Fechamento do Rio – Terceira Série de Provas (Série S-15 de ENSAIOS) – Maio, 1976.

CIRIA; CUR; CETMEF. **The Rock Manual. The use of rock in hydraulic engineering**. 2. ed. Londres: C683, CIRIA, 2007.

COMMISSION INTERNATIONALE DES GRANDS BARRAGES. **River control during dam construction**. Paris: ICOLD. (ICOLD BULLETIN 48a), 1986.

CURI, M. de F. S. **Fechamento do rio e estruturas normalmente utilizadas para desvio**. 175 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1986.

DAVIDSON, L. **An Introduction to Turbulence Models**. Göteborg: Suécia, 2003.

FERZIGER, J. H.; PERIC, M. **Computational Methods for Fluid Dynamics**. 3. ed. Berlin, Heidelberg, Nova York, Barcelona, Hong Kong, Londres, Milão, Paris, Tokyo: Springer, 2002.

FILL, G. **Modelagem Hidrodinâmica 3D de Escoamentos em Vertedouros**. 130 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) – Departamento de Hidráulica e Saneamento, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

FLOW SCIENCE. **FLOW 3D® v10.0 User manual**. 2011.

GOOGLE EARTH. Disponível em <<https://www.google.com/earth/>>. Acesso em: 29/11/2014.

GRAF, W. H. **Hydraulics of Sediment Transport**. 1970.

HENDERSON, F. M. **Open Channel Flow**. New York: MacMillan, 1966.

ITAIPU BINACIONAL. Disponível em <<https://www.itaipu.gov.br/>>. Acesso em: 16/08/2014.

JONES, W. P.; LAUNDER, B. E. The prediction of laminarization with a two-equation model of turbulence. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 15, p. 301-314, fevereiro 1972.

KUNDU, P. K.; COHEN, I. M. **Fluid Mechanics**. 4. ed. London, 2008.

LAUNDER, B. E; SHARMA, B. I. Application of the energy-dissipation model of turbulence to the calculation of flow near a spinning disc. **Letters in Heat and Mass Transfer**. v. 1, p. 131-137, novembro-dezembro 1974.

LINFORD, A. **A Review of Literature on the Construction of Rockfill Dams by Dumping Stones in Running Water**. [S.l.: s.n.], 1967.

MCDONOUGH, J. M. **Intruductory Lectures on Turbulence**. Departments of Mechanical Engineering and Mathematics University of Kentucky, 2007.

NEIDERT, S. H.; TOZZI, M. J. Considerações sobre o dimensionamento do material de ensecadeiras construídas em ponta de aterro. In: Congresso Latinoamericano de Hidráulica. São Paulo: ABRH, AIPH, 1986. P. 416-425.

NOVAK,P.; NALLURI,C. Incipient motion of sediment particles over fixed beds. **Journal of Hydraulic Research**, v. 22, no. 3, p. 181-197, 1984.

OTA, J. J.; NALLURI, C. Condição crítica de arraste de sedimentos sobre leitos fixos. In: CONGRESSO LATINO AMERICANO DE HIDRÁULICA, 21, 2004, São Pedro. [S.l.: s.n.], 2004.

OTA, J. J. **Effect of particle size and gradation on sediment transport in storm sewers**. 187 f. Tese (Doctor of Philosophy in Civil Engineering) – Department of civil engineering – University of Newcastle upon Tyne, Newcastle, 1999.

PEDROLI, R. **Bed load transportation in channels with fixed and smooth inverts**. PhD Thesis – Scuola Politecnica Federale, Zurigo, Switzerland, 1963.

PEREIRA, M. A. C. **Ensecadeiras de enrocamento construídas em água corrente pelo método de lançamento por ponta de aterro**. 146 f. Dissertação (Mestrado) – Setor de Tecnologia - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2001.

PINTO, N. L. de S. **Contribuição ao Estudo das Barragens de Enrocamento Construídas em Água Corrente**. 144 f. Tese (Concurso de Professor Titular do Departamento de Hidráulica e Saneamento) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1977.

REZENDE, A. L. T. **Análise Numérica da Bolha de Separação do Escoamento Turbulento sobre Placa Plana Fina Inclinada**. Tese de Doutorado – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2009.

ROCHA, G. dos S. C. **Desvio de Rios para a Construção de Barragens**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

SANTO ANTONIO ENERGIA. **UHE Santo Antonio – Fechamento do Cordão de Enrocamento do Leito do Rio**. Disponível em <<http://slideplayer.com.br/>>. Acesso em: 14/09/2014.

SHIELDS, A. **Application of similarity principles and turbulence research to bed-load movement**. Traduzido de Anwendung der Aehnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschuebebewegung. Mitteilungen der Preussischen Versuchsanstalt fur Wasserbau und Schiffbau. Berlin, 1936.

SOUZA, V. F.; MATOS, J. S.; SILVA, J. S. Aplicação da modelação numérica à avaliação do desempenho hidráulico de componentes de estações de tratamento de águas residuais: o caso de um grande sistema de saneamento em Portugal. In: Simpósio Luso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 15, [20--].

TASK COMMITTEE ON PREPARATION OF SEDIMENTATION MANUAL. **Sediment transportation mechanics: initiation of motion: progress report.** Journal of the Hydraulics Division., n. 2, p. 291, Março, 1966.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS. **Fundamentos da Mecânica dos Fluidos.** Disponível em: < <http://www2.eesc.usp.br/netef/Oscar/Aula21>>. Acesso em 26/07/2014.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. **An Introduction to Computational Fluid Dynamics, The Finite Volume Method.** Londres, 1995.

WHITE, C. M. **The Equilibrium of Grains on the Bed of a Stream**". Proceedings Royal Society of London, Series A, nº 958, v. 174, Fevereiro 1940.

## APÊNDICES

APÊNDICE 1 – RESULTADOS DA SIMULAÇÃO EM MODELO NUMÉRICO DO ESTUDO DE CASO DA INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL DE PEREIRA (2001).....	136
APÊNDICE 2 – RESULTADOS DA SIMULAÇÃO EM MODELO NUMÉRICO DO ESTUDO DE VARIAÇÃO DA LARGURA DA CRISTA DA ENSECADEIRA .....	138
APÊNDICE 3 – RESULTADOS DA SIMULAÇÃO EM MODELO NUMÉRICO DO ESTUDO DE VARIAÇÃO DA INCLINAÇÃO DO TALUDE DA ENSECADEIRA .....	140

APÊNDICE 1 – RESULTADOS DA SIMULAÇÃO EM MODELO NUMÉRICO DO ESTUDO DE CASO DA INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL DE PEREIRA (2001)

Seção	Alinhamento	Ponto	ESTUDO MODELO NUMÉRICO		ESTUDO MODELO FÍSICO PEREIRA (2001)	
			Velocidade (m/s)	v/U	Velocidade (m/s)	v/U
A	0°	1	0,064	0,400	0,142	0,888
		2	0,106	0,664	0,139	0,869
		3	0,114	0,710	0,142	0,888
		4	0,114	0,710	0,130	0,813
		5	0,122	0,760	0,142	0,888
		6	0,128	0,797	0,149	0,931
		7	0,132	0,825	0,153	0,956
		8	0,135	0,847	0,137	0,856
		9	0,141	0,880	0,160	1,000
		10	0,143	0,896	0,142	0,888
	45°	1	0,201	1,259	0,221	1,381
		2	0,285	1,778	0,291	1,819
		3	0,292	1,828	0,291	1,819
		4	0,294	1,835	0,291	1,819
		5	0,293	1,832	0,286	1,788
		6	0,291	1,817	0,288	1,800
		7	0,288	1,800	0,295	1,844
		8	0,285	1,783	0,304	1,900
		9	0,278	1,739	0,312	1,950
		10	0,271	1,694	0,274	1,713
	90°	1	0,229	1,432	0,340	2,125
		2	0,418	2,615	0,450	2,813
		3	0,460	2,877	0,466	2,913
		4	0,466	2,914	0,459	2,869
		5	0,467	2,919	0,476	2,975
		6	0,466	2,913	0,472	2,950
		7	0,464	2,900	0,463	2,894
		8	0,462	2,885	0,473	2,956
		9	0,456	2,848	0,481	3,006
		10	0,451	2,817	0,484	3,025
B	0°	1	0,131	0,818	0,130	0,813
		2	0,145	0,907	0,149	0,931
		3	0,149	0,929	0,153	0,956
		4	0,150	0,935	0,142	0,888
		5	0,150	0,938	0,142	0,888
		6	0,150	0,940	0,146	0,913
		7	0,150	0,940	0,183	1,144
		8	0,150	0,939	0,183	1,144

Seção	Alinhamento	Ponto	ESTUDO MODELO NUMÉRICO		ESTUDO MODELO FÍSICO PEREIRA (2001)	
			Velocidade (m/s)	v/U	Velocidade (m/s)	v/U
			9	0,149	0,928	0,183
45°	1	0,303	1,893	0,300	1,875	
	2	0,337	2,107	0,340	2,125	
	3	0,346	2,163	0,338	2,113	
	4	0,346	2,160	0,341	2,131	
	5	0,344	2,149	0,344	2,150	
	6	0,337	2,107	0,337	2,106	
	7	0,330	2,061	0,336	2,100	
	8	0,323	2,021	0,322	2,013	
	9	0,310	1,937	0,314	1,963	
	90°	1	0,285	1,783	0,342	2,138
2		0,425	2,656	0,517	3,231	
3		0,473	2,953	0,512	3,200	
4		-	-	0,518	3,238	
5		0,483	3,016	0,515	3,219	
6		0,482	3,013	0,504	3,150	
7		0,480	2,999	0,495	3,094	
8		0,476	2,977	0,498	3,113	
9		0,469	2,930	0,480	3,000	
C	0°	1	0,172	1,074	0,183	1,144
		2	0,189	1,179	0,214	1,338
		3	0,193	1,205	0,197	1,231
		4	0,193	1,204	0,201	1,256
		5	0,191	1,196	0,201	1,256
		6	0,187	1,170	0,205	1,281
		7	0,183	1,142	0,187	1,169
	45°	1	0,370	2,312	0,397	2,481
		2	0,409	2,554	0,426	2,663
		3	0,416	2,600	0,425	2,656
		4	0,413	2,581	0,412	2,575
		5	0,408	2,550	0,412	2,575
		6	0,396	2,475	0,389	2,431
		7	0,386	2,411	0,389	2,431
	90°	1	0,307	1,920	0,370	2,313
		2	0,419	2,617	0,530	3,313
		3	0,475	2,966	0,529	3,306
		4	0,491	3,071	0,527	3,294
		5	0,496	3,099	0,523	3,269
		6	0,497	3,108	0,524	3,275
		7	0,496	3,098	0,509	3,181

APÊNDICE 2 – RESULTADOS DA SIMULAÇÃO EM MODELO NUMÉRICO DO ESTUDO DE VARIAÇÃO DA LARGURA DA CRISTA DA ENSECADEIRA

Seção	Alinhamento	Ponto	ESTUDO MODELO NUMÉRICO ENSECADEIRA R = 0,1 m		ESTUDO MODELO NUMÉRICO ENSECADEIRA ORIGINAL (R = 0,15 m)		ESTUDO MODELO NUMÉRICO ENSECADEIRA R = 0,2 m		ESTUDO MODELO NUMÉRICO ENSECADEIRA R = 0,4 m	
			Velocidade (m/s)	v/U	Velocidade (m/s)	v/U	Velocidade (m/s)	v/U	Velocidade (m/s)	v/U
A	0°	1	0,076	0,474	0,064	0,400	-	-	0,047	0,291
		2	0,110	0,686	0,106	0,664	0,101	0,634	0,085	0,534
		3	0,121	0,759	0,114	0,710	0,109	0,680	0,093	0,580
		4	0,128	0,800	0,114	0,710	0,113	0,706	0,097	0,607
		5	0,133	0,829	0,122	0,760	0,117	0,728	0,101	0,632
		6	0,139	0,870	0,128	0,797	0,123	0,766	0,108	0,674
		7	0,143	0,894	0,132	0,825	0,127	0,795	0,113	0,708
		8	0,145	0,906	0,135	0,847	0,131	0,817	0,118	0,735
		9	0,146	0,910	0,141	0,880	0,136	0,852	0,125	0,782
		10	0,144	0,901	0,143	0,896	0,139	0,870	0,130	0,811
	45°	1	0,200	1,248	0,201	1,259	-	-	0,196	1,222
		2	0,287	1,793	0,285	1,778	0,280	1,749	0,277	1,734
		3	0,300	1,877	0,292	1,828	0,289	1,804	0,285	1,784
		4	0,302	1,885	0,294	1,835	0,290	1,813	0,287	1,792
		5	0,301	1,882	0,293	1,832	0,290	1,811	0,287	1,792
		6	0,299	1,868	0,291	1,817	0,288	1,798	0,285	1,782
		7	0,296	1,849	0,288	1,800	0,285	1,781	0,283	1,769
		8	0,292	1,827	0,285	1,783	0,282	1,764	0,281	1,755
		9	0,283	1,766	0,278	1,739	0,275	1,722	0,275	1,718
		10	0,273	1,708	0,271	1,694	0,269	1,679	0,269	1,681
	90°	1	0,258	1,611	0,229	1,432	-	-	0,254	1,590
		2	0,436	2,723	0,418	2,615	0,429	2,683	0,431	2,695
		3	0,474	2,961	0,460	2,877	0,461	2,883	0,466	2,910
		4	0,475	2,972	0,466	2,914	0,464	2,899	0,469	2,930
		5	0,473	2,959	0,467	2,919	0,463	2,893	0,468	2,927
		6	0,468	2,926	0,466	2,913	0,460	2,875	0,466	2,911
		7	0,463	2,893	0,464	2,900	0,457	2,854	0,463	2,893
		8	0,458	2,865	0,462	2,885	0,454	2,835	0,460	2,877
		9	0,450	2,811	0,456	2,848	0,447	2,796	0,455	2,842
		10	0,443	2,767	0,451	2,817	0,442	2,765	0,451	2,816
B	0°	1	0,148	0,927	0,131	0,818	0,123	0,771	0,102	0,635
		2	0,162	1,015	0,145	0,907	0,138	0,866	0,113	0,706
		3	0,168	1,050	0,149	0,929	0,142	0,886	0,116	0,723
		4	0,169	1,055	0,150	0,935	0,143	0,892	0,117	0,730
		5	0,168	1,052	0,150	0,938	0,143	0,895	0,118	0,735
		6	0,166	1,036	0,150	0,940	0,144	0,897	0,119	0,745
		7	0,163	1,016	0,150	0,940	0,144	0,898	0,121	0,753
		8	0,159	0,995	0,150	0,939	0,143	0,897	0,122	0,761
		9	0,152	0,950	0,149	0,928	0,142	0,889	0,123	0,766
	45°	1	0,303	1,895	0,303	1,893	0,292	1,822	0,282	1,764
		2	0,344	2,148	0,337	2,107	0,327	2,041	0,320	1,999

Seção	Alinhamento	Ponto	ESTUDO MODELO NUMÉRICO ENSECADEIRA R = 0,1 m		ESTUDO MODELO NUMÉRICO ENSECADEIRA ORIGINAL (R = 0,15 m)		ESTUDO MODELO NUMÉRICO ENSECADEIRA R = 0,2 m		ESTUDO MODELO NUMÉRICO ENSECADEIRA R = 0,4 m		
			Velocidade (m/s)	v/U	Velocidade (m/s)	v/U	Velocidade (m/s)	v/U	Velocidade (m/s)	v/U	
		3	0,356	2,227	0,346	2,163	0,337	2,105	0,330	2,060	
		4	0,355	2,222	0,346	2,160	0,337	2,106	0,330	2,063	
		5	0,352	2,201	0,344	2,149	0,336	2,099	0,329	2,058	
		6	0,343	2,145	0,337	2,107	0,330	2,065	0,325	2,031	
		7	0,335	2,093	0,330	2,061	0,324	2,025	0,320	1,998	
		8	0,327	2,047	0,323	2,021	0,318	1,987	0,314	1,964	
		9	0,313	1,955	0,310	1,937	0,305	1,908	0,303	1,894	
		90°	1	0,332	2,077	0,285	1,783	0,312	1,952	0,307	1,919
			2	0,466	2,915	0,425	2,656	0,446	2,790	0,449	2,809
	3		0,502	3,138	0,473	2,953	0,480	3,000	0,485	3,034	
	4		-	-	-	-	-	-	-	-	
	5		0,501	3,129	0,483	3,016	0,482	3,012	0,489	3,057	
	6		0,492	3,076	0,482	3,013	0,479	2,991	0,486	3,039	
	C	0°	1	0,202	1,265	0,172	1,074	0,158	0,990	0,121	0,755
			2	0,219	1,368	0,189	1,179	0,179	1,120	0,136	0,849
3			0,223	1,395	0,193	1,205	0,183	1,143	0,139	0,868	
4			0,221	1,380	0,193	1,204	0,183	1,143	0,139	0,871	
5			0,216	1,352	0,191	1,196	0,182	1,135	0,139	0,869	
6			0,204	1,277	0,187	1,170	0,178	1,112	0,137	0,858	
7			0,193	1,207	0,183	1,142	0,173	1,084	0,135	0,841	
45°		1	0,380	2,373	0,370	2,312	0,355	2,219	0,342	2,139	
		2	0,422	2,640	0,409	2,554	0,394	2,462	0,380	2,374	
		3	0,432	2,697	0,416	2,600	0,403	2,516	0,390	2,437	
		4	0,426	2,662	0,413	2,581	0,401	2,504	0,389	2,433	
		5	0,418	2,611	0,408	2,550	0,397	2,480	0,387	2,417	
		6	0,401	2,506	0,396	2,475	0,387	2,416	0,379	2,366	
90°		1	0,387	2,422	0,386	2,411	0,377	2,356	0,370	2,315	
		1	0,362	2,262	0,307	1,920	0,324	2,022	0,316	1,974	
	2	0,471	2,947	0,419	2,617	0,437	2,732	0,448	2,803		
	3	0,517	3,228	0,475	2,966	0,482	3,014	0,499	3,116		
	4	0,524	3,278	0,491	3,071	0,492	3,077	0,508	3,177		
	5	0,522	3,263	0,496	3,099	0,494	3,088	0,510	3,186		
	6	0,513	3,207	0,497	3,108	0,493	3,083	0,509	3,178		
7	0,504	3,152	0,496	3,098	0,491	3,071	0,506	3,162			

APÊNDICE 3 – RESULTADOS DA SIMULAÇÃO EM MODELO NUMÉRICO DO ESTUDO DE VARIAÇÃO DA INCLINAÇÃO DO TALUDE DA ENSECADEIRA

Seção	Alinhamento	Ponto	ESTUDO MODELO NUMÉRICO ENSECADEIRA ORIGINAL (Inclinação do Talude = 34°)		ESTUDO MODELO NUMÉRICO ENSECADEIRA Inclinação do Talude = 25°	
			Velocidade (m/s)	v/U	Velocidade (m/s)	v/U
A	0°	1	0,064	0,400	0,064	0,403
		2	0,106	0,664	0,087	0,543
		3	0,114	0,710	0,095	0,597
		4	0,114	0,710	0,104	0,650
		5	0,122	0,760	0,110	0,688
		6	0,128	0,797	0,117	0,734
		7	0,132	0,825	0,121	0,758
		8	0,135	0,847	0,123	0,770
		9	0,141	0,880	0,124	0,776
		10	0,143	0,896	0,123	0,772
	45°	1	0,201	1,259	0,183	1,142
		2	0,285	1,778	0,241	1,505
		3	0,292	1,828	0,251	1,567
		4	0,294	1,835	0,253	1,584
		5	0,293	1,832	0,255	1,591
		6	0,291	1,817	0,255	1,597
		7	0,288	1,800	0,255	1,593
		8	0,285	1,783	0,253	1,583
		9	0,278	1,739	0,248	1,552
		10	0,271	1,694	0,243	1,518
	90°	1	0,229	1,432	0,262	1,636
		2	0,418	2,615	0,424	2,648
		3	0,460	2,877	0,454	2,840
		4	0,466	2,914	0,455	2,846
		5	0,467	2,919	0,455	2,841
		6	0,466	2,913	0,452	2,827
		7	0,464	2,900	0,450	2,812
		8	0,462	2,885	0,448	2,797
		9	0,456	2,848	0,441	2,759
	B	0°	1	0,131	0,818	0,106
2			0,145	0,907	0,118	0,739
3			0,149	0,929	0,124	0,774
4			0,150	0,935	0,126	0,787
5			0,150	0,938	0,127	0,793
6			0,150	0,940	0,127	0,795
7			0,150	0,940	0,126	0,790
8			0,150	0,939	0,125	0,782
9			0,149	0,928	0,122	0,762

Seção	Alinhamento	Ponto	ESTUDO MODELO NUMÉRICO ENSECADEIRA ORIGINAL (Inclinação do Talude = 34°)		ESTUDO MODELO NUMÉRICO ENSECADEIRA Inclinação do Talude = 25°	
			Velocidade (m/s)	v/U	Velocidade (m/s)	v/U
	45°	1	0,303	1,893	0,227	1,416
		2	0,337	2,107	0,275	1,719
		3	0,346	2,163	0,288	1,802
		4	0,346	2,160	0,290	1,813
		5	0,344	2,149	0,290	1,810
		6	0,337	2,107	0,287	1,791
		7	0,330	2,061	0,283	1,769
		8	0,323	2,021	0,280	1,747
		9	0,310	1,937	0,272	1,699
	90°	1	0,285	1,783	0,297	1,853
		2	0,425	2,656	0,425	2,658
		3	0,473	2,953	0,465	2,907
		4	-	-	-	-
		5	0,483	3,016	0,468	2,924
		6	0,482	3,013	0,464	2,902
		7	0,480	2,999	0,460	2,874
		8	0,476	2,977	0,456	2,851
		9	0,469	2,930	0,450	2,814
C	0°	1	0,172	1,074	0,115	0,721
		2	0,189	1,179	0,137	0,859
		3	0,193	1,205	0,144	0,899
		4	0,193	1,204	0,145	0,908
		5	0,191	1,196	0,145	0,905
		6	0,187	1,170	0,141	0,884
		7	0,183	1,142	0,137	0,854
	45°	1	0,370	2,312	0,271	1,696
		2	0,409	2,554	0,315	1,972
		3	0,416	2,600	0,329	2,058
		4	0,413	2,581	0,330	2,064
		5	0,408	2,550	0,329	2,054
		6	0,396	2,475	-	-
		7	0,386	2,411	0,318	1,986
	90°	1	0,307	1,920	0,307	1,916
		2	0,419	2,617	0,425	2,654
		3	0,475	2,966	0,471	2,943
		4	0,491	3,071	0,477	2,982
		5	0,496	3,099	0,476	2,976
		6	0,497	3,108	0,472	2,953
		7	0,496	3,098	0,468	2,927

**ANEXOS**

ANEXO 1 – PERMISSÃO PARA USO DA LICENÇA DO PROGRAMA FLOW 3D®.

.....143

## ANEXO 1 – PERMISSÃO PARA USO DA LICENÇA DO PROGRAMA FLOW 3D®.

**Intertechne**

Intertechne Consultores S.A.  
Avenida João Gualberto, 1259 – Sobreloja – Alto da Glória  
80030-001 Curitiba – Paraná  
Tel.: (+55 41) 3219-7200  
Fax: (+55 41) 3219-7848

Curitiba, 13 de Dezembro de 2013

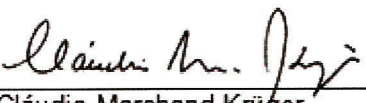
Ref: permissão de uso do software Flow 3D

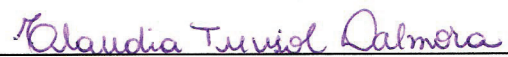
Prof. Tobias Bleninger  
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e  
Ambiental – PPGERHA

Prezado Senhor,

A Intertechne Consultores S.A. vem por meio desta formalizar a permissão de uso do software FLOW-3D, do qual a empresa possui uma licença, à colaboradora Cláudia Trevisol Dalmora, para que a mesma realize as simulações necessárias para a elaboração de sua dissertação de mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambientais.

Atenciosamente,

  
Cláudio Marchand Krüger  
Chefe do Departamento de Hidráulica - SEB

  
Cláudia Trevisol Dalmora  
Engenheira Civil  
Departamento de Hidráulica - SEB