



LABORATÓRIO NACIONAL  
DE ENGENHARIA CIVIL

DEPARTAMENTO DE HIDRÁULICA E AMBIENTE  
Núcleo de Estuários e Zonas Costeiras

Proc. 604/011/17744

## **EFEITOS DE ESCALA EM MODELAÇÃO NUMÉRICA DA EROÇÃO DE UM PERFIL DE PRAIA**

LISBOA • agosto de 2012

**I & D HIDRÁULICA E AMBIENTE**  
RELATÓRIO /2012 - NEC





**EFEITOS DE ESCALA EM MODELAÇÃO NUMÉRICA DA  
EROSÃO DE UM PERFIL DE PRAIA**

**SCALE EFFECTS IN NUMERICAL MODELLING OF BEACH  
PROFILE EROSION**

**EFFETS D'ÉCHELLE DANS LA MODÉLISATION NUMÉRIQUE  
DE L'ÉROSION D'UN PROFIL DE PLAGE**



# EFEITOS DE ESCALA EM MODELAÇÃO NUMÉRICA DA EROSÃO DE UM PERFIL DE PRAIA

## RESUMO

Este estudo enquadra-se na área da investigação científica da dinâmica costeira. O objetivo global do estudo foi melhorar a modelação numérica da morfodinâmica de praias a curto-prazo, através da validação de um modelo numérico a diferentes escalas, e o objetivo específico foi averiguar sobre a existência de efeitos de escala na modelação numérica. Para concretizar este objetivo realizaram-se ensaios laboratoriais, em canal de ondas irregulares, para simular a erosão de um perfil da praia de Buarcos, Figueira da Foz, que foram reproduzidos em modelo numérico à escala laboratorial e à escala do protótipo. Numa primeira fase, os resultados de ambas as aplicações foram validados com os resultados experimentais. Numa segunda fase, após reduzidos à escala laboratorial, os resultados numéricos à escala do protótipo foram comparados com os resultados numéricos à escala laboratorial. A avaliação do desempenho do modelo numérico baseou-se na observação da similaridade entre previsões (resultados numéricos) e medições (resultados experimentais) e no indicador de erro BSS, que foi calculado para cada teste. Nas aplicações do modelo numérico, em ambas as escalas, realizaram-se testes com os parâmetros por defeito recomendados pelos autores do modelo e posteriormente executou-se a calibração com base em cinco parâmetros principais associados a condições de onda (parâmetros de rebentação e turbulência) e condições de morfodinâmica. Concluiu-se que o processo de erosão do perfil de praia foi sobrestimado à escala reduzida e subestimado à escala do protótipo, quer na aplicação do modelo com os parâmetros por defeito, quer na aplicação do modelo calibrado. O indicador de erro BSS aponta para um melhor desempenho do modelo numérico à escala do protótipo do que à escala reduzida. Como conclusão principal, constatou-se que existem efeitos de escala na simulação numérica da erosão de um perfil de praia com o modelo Litprof.

**Palavras-chave:** Erosão Costeira, Modelação Morfodinâmica, Curto-prazo, Litprof, Efeitos de Escala.



# EFEITOS DE ESCALA EM MODELAÇÃO NUMÉRICA DA EROSÃO DE UM PERFIL DE PRAIA

## Índice

---

Índice	V
Índice de figuras	VI
Índice de tabelas	X
<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1 ENQUADRAMENTO, MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS	1
1.2 ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO	1
<b>2. METODOLOGIA</b>	<b>2</b>
2.1 MODELO LITPROF	2
2.2 CASO DE ESTUDO	3
2.3 ABORDAGEM METODOLÓGICA	4
2.4 AVALIAÇÃO DE RESULTADOS	7
<b>3. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>8</b>
3.1 MODELAÇÃO NUMÉRICA À ESCALA DO MODELO REDUZIDO	8
3.1.1 <i>Resultados default</i>	8
3.1.2 <i>Calibração</i>	8
3.2 MODELAÇÃO NUMÉRICA À ESCALA DO PROTÓTIPO	12
3.2.1 <i>Resultados default</i>	12
3.2.2 <i>Calibração</i>	12
3.3 COMPARAÇÃO ENTRE RESULTADOS NUMÉRICOS À ESCALA DO MODELO REDUZIDO E DO PROTÓTIPO	15
3.3.1 <i>Resultados default</i>	15
3.3.2 <i>Calibração</i>	16
<b>4. CONCLUSÃO</b>	<b>19</b>
<b>5. REFERÊNCIAS</b>	<b>20</b>
<b>ANEXO A: MODELO REDUZIDO</b>	<b>21</b>
<b>ANEXO B: PROTÓTIPO</b>	<b>33</b>
<b>ANEXO C: COMPARAÇÕES</b>	<b>45</b>



# EFEITOS DE ESCALA EM MODELAÇÃO NUMÉRICA DA EROSÃO DE UM PERFIL DE PRAIA

## Índice de figuras

---

Figura 1 – Esquema simplificado do modelo Litprof. ....	3
Figura 2 – Vista do batedor de ondas irregulares e canal de ondas COI2. ....	3
Figura 3 – Esquema do perfil de praia laboratorial inicial no canal de ondas irregulares do LNEC COI2. ..	4
Figura 4 - Evolução do perfil para o caso de estudo (envelope da observação experimental). ....	4
Figura 5 – Resultados experimentais e numéricos para o caso default da evolução do perfil ao fim de 11 horas. ....	8
Figura 6 - Resultados da evolução do perfil ao fim de 11 horas. Teste ao parâmetro gamma1. ....	9
Figura 7 - Resultados da evolução do perfil ao fim de 11 horas. Teste ao parâmetro gamma2. ....	9
Figura 8 - Resultados da evolução do perfil ao fim de 11 horas. Teste aos parâmetros gamma1 e gamma2 combinados. ....	9
Figura 9 - Resultados da evolução do perfil ao fim de 11 horas. Teste ao parâmetro beta. ....	10
Figura 10 - Resultados da evolução do perfil ao fim de 11 horas. Teste ao parâmetro max angle. ....	10
Figura 11 - Resultados da evolução do perfil ao fim de 11 horas. Teste ao parâmetro scale parameter. ....	10
Figura 12 - Resultados experimentais e numéricos para o caso default da evolução do perfil de praia ao fim de 11 horas. ....	12
Figura 13 - Resultados da evolução do perfil ao fim de 11 horas. Teste ao parâmetro gamma1. ....	13
Figura 14 - Resultados da evolução do perfil ao fim de 11 horas. Teste ao parâmetro gamma2. ....	13
Figura 15 - Resultados da evolução do perfil ao fim de 11 horas. Teste ao parâmetro beta. ....	14
Figura 16 - Resultados da evolução do perfil ao fim de 11 horas. Teste ao parâmetro max angle. ....	14
Figura 17 - Resultados da evolução do perfil ao fim de 11 horas. Teste ao parâmetro scale parameter. ....	14
Figura 18 – Comparação entre os resultados experimentais e os resultados numéricos (à escala laboratorial e à escala do protótipo) para o caso default da evolução do perfil ao fim de 11 horas. ....	16
Figura 19 - Comparação entre os resultados experimentais e os resultados numéricos (à escala laboratorial e à escala do protótipo) da calibração do parâmetro gamma1 para a evolução do perfil ao fim de 11 horas. ....	17
Figura 20 - Comparação entre os resultados experimentais e os resultados numéricos (à escala laboratorial e à escala do protótipo), da calibração do parâmetro gamma2 para a evolução do perfil ao fim de 11 horas. ....	17
Figura 21 - Comparação entre os resultados experimentais e os resultados numéricos (à escala laboratorial e à escala do protótipo), da calibração do parâmetro beta para a evolução do perfil ao fim de 11 horas. ....	17

Figura 22 - Comparação entre os resultados experimentais e os resultados numéricos (à escala laboratorial e à escala do protótipo), da calibração do parâmetro max angle para a evolução do perfil ao fim de 11 horas. ....	18
Figura 23 - Comparação entre os resultados experimentais e os resultados numéricos (à escala laboratorial e à escala do protótipo), da calibração do parâmetro scale parameter para a evolução do perfil ao fim de 11 horas. ....	18
Figura 24 – Resultados da evolução da variável Hrms ao longo de 11 horas de simulação numérica, para o caso default. ....	23
Figura 25 – Comparação dos resultados experimentais e numéricos da variável Hrms, para o caso default.....	23
Figura 26 - Resultados da evolução do nível da água ao longo de 11 horas de simulação numérica, para o caso default. ....	23
Figura 27 – Resultados da evolução do transporte sedimentar ao longo de 11 horas de simulação numérica, para o caso default. ....	24
Figura 28 – Resultados da evolução do transporte sedimentar integrado ao longo de 11 horas de simulação numérica, para o caso default.....	24
Figura 29 – Resultados da evolução da variável Hrms ao fim de 11 horas. Teste ao parâmetro gamma1.....	24
Figura 30 - Resultados da evolução do nível da água ao fim de 11 horas. Teste ao parâmetro gamma1. ....	25
Figura 31 - Resultados da evolução do transporte sedimentar ao fim de 11 horas. Teste ao parâmetro gamma1.....	25
Figura 32 - Resultados da evolução do transporte sedimentar integrado ao fim de 11 horas. Teste ao parâmetro gamma1. ....	25
Figura 33 - Resultados da evolução da variável Hrms ao fim de 11 horas. Teste ao parâmetro gamma2. ....	26
Figura 34 - Resultados da evolução do nível da água ao fim de 11 horas. Teste ao parâmetro gamma2. ....	26
Figura 35 - Resultados da evolução do transporte sedimentar ao fim de 11 horas. Teste ao parâmetro gamma2.....	26
Figura 36 - Resultados da evolução do transporte sedimentar integrado ao fim de 11 horas. Teste ao parâmetro gamma2. ....	27
Figura 37 - Resultados da evolução da variável Hrms ao fim de 11 horas. Teste aos parâmetros gamma1 e gamma2.....	27
Figura 38 - Resultados da evolução da variável Hrms ao fim de 11 horas. Teste ao parâmetro beta. ....	27
Figura 39 - Resultados da evolução do nível da água ao fim de 11 horas. Teste ao parâmetro beta.....	28
Figura 40 - Resultados da evolução do transporte sedimentar ao fim de 11 horas. Teste ao parâmetro beta.....	28
Figura 41 - Resultados da evolução do transporte sedimentar integrado ao fim de 11 horas. Teste ao parâmetro beta. ....	28

Figura 42 - Resultados da evolução da variável Hrms ao fim de 11 horas. Teste ao parâmetro max angle. ....	29
Figura 43 - Resultados da evolução do nível da água ao fim de 11 horas. Teste ao parâmetro max angle. .....	29
Figura 44 - Resultados da evolução do transporte sedimentar ao fim de 11 horas. Teste ao parâmetro max angle.....	29
Figura 45 - Resultados da evolução do transporte sedimentar integrado ao fim de 11 horas. Teste ao parâmetro max angle.....	30
Figura 46 - Resultados da evolução da variável Hrms ao fim de 11 horas. Teste ao parâmetro scale parameter. ....	30
Figura 47 - Resultados da evolução do nível da água ao fim de 11 horas. Teste ao parâmetro scale parameter. ....	30
Figura 48 - Resultados da evolução do transporte sedimentar ao fim de 11 horas. Teste ao parâmetro scale parameter.....	31
Figura 49 - Resultados da evolução do transporte sedimentar integrado ao fim de 11 horas. Teste ao parâmetro scale parameter. ....	31
Figura 50 – Resultados da evolução da variável Hrms ao fim de 27 horas, para o caso default.....	35
Figura 51 – Comparação dos resultados experimentais e numéricos da variável Hrms, para o caso default. ....	35
Figura 52 - Resultados da evolução do nível da água ao fim de 27 horas, para o caso default.....	35
Figura 53 - Resultados da evolução do transporte sedimentar ao fim de 27 horas, para o caso default..	36
Figura 54 - Resultados da evolução do transporte sedimentar integrado ao fim de 27 horas, para o caso default. ....	36
Figura 55 - Resultados da evolução da variável Hrms ao fim de 27 horas. Teste ao parâmetro gamma1.....	36
Figura 56 - Resultados da evolução do nível da água ao fim de 27 horas. Teste ao parâmetro gamma1.....	37
Figura 57 - Resultados da evolução do transporte sedimentar ao fim de 27 horas. Teste ao parâmetro gamma1.....	37
Figura 58 - Resultados da evolução do transporte sedimentar integrado ao fim de 27 horas. Teste ao parâmetro gamma1.....	37
Figura 59 - Resultados da evolução da variável Hrms ao fim de 27 horas. Teste ao parâmetro gamma2. .....	38
Figura 60 - Resultados da evolução do nível da água ao fim de 27 horas. Teste ao parâmetro gamma2.....	38
Figura 61 - Resultados da evolução do transporte sedimentar ao fim de 27 horas. Teste ao parâmetro gamma2.....	38
Figura 62 - Resultados da evolução do transporte sedimentar integrado ao fim de 27 horas. Teste ao parâmetro gamma2. ....	39
Figura 63 - Resultados da evolução da variável Hrms ao fim de 27 horas. Teste ao parâmetro beta.....	39
Figura 64 - Resultados da evolução do nível da água ao fim de 27 horas. Teste ao parâmetro beta.....	39

Figura 65 - Resultados da evolução do transporte sedimentar ao fim de 27 horas. Teste ao parâmetro beta.....	40
Figura 66 - Resultados da evolução do transporte sedimentar integrado ao fim de 27 horas. Teste ao parâmetro beta. ....	40
Figura 67 - Resultados da evolução da variável Hrms ao fim de 27 horas. Teste ao parâmetro max angle. ....	40
Figura 68 - Resultados da evolução do nível da água ao fim de 27 horas. Teste ao parâmetro max angle. ....	41
Figura 69 - Resultados da evolução do transporte sedimentar ao fim de 27 horas. Teste ao parâmetro max angle.....	41
Figura 70 - Resultados da evolução do transporte sedimentar integrado ao fim de 27 horas. Teste ao parâmetro max angle. ....	41
Figura 71 - Resultados da evolução da variável Hrms ao fim de 27 horas. Teste ao parâmetro scale parameter. ....	42
Figura 72 - Resultados da evolução do nível da água ao fim de 27 horas. Teste ao parâmetro scale parameter. ....	42
Figura 73 - Resultados da evolução do transporte sedimentar ao fim de 27 horas. Teste ao parâmetro scale parameter. ....	42
Figura 74 – Resultados da evolução do transporte sedimentar integrado ao fim de 27 horas. Teste ao parâmetro scale Parameter. ....	43
Figura 75 - Comparação entre os resultados experimentais e os resultados numéricos (na escala laboratorial e na escala do protótipo) da variável Hrms, para o caso default. ....	47
Figura 76 - Comparação entre os resultados experimentais e os resultados numéricos (na escala laboratorial e na escala do protótipo) da variável Hrms. Teste ao parâmetro gamma1. ....	47
Figura 77 - Comparação entre os resultados experimentais e os resultados numéricos (na escala laboratorial e na escala do protótipo) da variável Hrms. Teste ao parâmetro gamma2. ....	47
Figura 78 - Comparação entre os resultados experimentais e os resultados numéricos (na escala laboratorial e na escala do protótipo) da variável Hrms. Teste ao parâmetro beta. ....	48
Figura 79 - Comparação entre os resultados experimentais e os resultados numéricos (na escala laboratorial e na escala do protótipo) da variável Hrms. Teste ao parâmetro max angle. ....	48
Figura 80 - Comparação entre os resultados experimentais e os resultados numéricos (na escala laboratorial e na escala do protótipo) da variável Hrms. Teste ao parâmetro scale parameter.....	48

# EFEITOS DE ESCALA EM MODELAÇÃO NUMÉRICA DA EROSÃO DE UM PERFIL DE PRAIA

## Índice de tabelas

---

Tabela 1 – Principais parâmetros de calibração do modelo Litprof. ....	5
Tabela 2 - Classificação proposta por van Rijn <i>et al.</i> (2003) e Sutherland <i>et al.</i> (2004). ....	7
Tabela 3 – Valores de BSS obtidos nos testes realizados com escala do modelo reduzido. ....	11
Tabela 4 - Valores de BSS obtidos nos testes realizados com escala do protótipo. ....	15

# **EFEITOS DE ESCALA EM MODELAÇÃO NUMÉRICA DA EROSÃO DE UM PERFIL DE PRAIA**

## **1. Introdução**

### **1.1 Enquadramento, motivação e objetivos**

O estudo que aqui se descreve enquadra-se no âmbito do projeto “Dinâmica hidro-sedimentar do litoral a curto e médio prazo” do Plano de Investigação Programada (PIP) do LNEC para 2009-2012. Trata-se de um estudo na área da dinâmica costeira que teve como objetivo global melhorar a modelação numérica da morfodinâmica de praias a curto prazo, através da validação de um modelo numérico a diferentes escalas, e objetivo específico a avaliação de efeitos de escala na modelação numérica.

A aplicação combinada de modelos numéricos e modelos laboratoriais à escala reduzida (modelos físicos), para além de permitir melhorar o conhecimento final sobre os processos simulados, permite também melhorar cada uma das metodologias individualmente. Por um lado, a medição de parâmetros no âmbito da experiência laboratorial permite a validação de parâmetros numéricos e, assim, o alcance de um maior controlo dos resultados numéricos; por outro lado, a simulação numérica permite executar um mais alargado conjunto de condições de teste que em modelo físico não só demorariam mais tempo como também poderiam ser impossíveis executar (por motivos tais como limitação da dimensão das infraestruturas, custos, quer de material quer de dedicação humana, associados).

Dado o interesse na aplicação de modelos numéricos de morfodinâmica de praias a curto prazo às escalas dos modelos reduzidos, torna-se necessário realizar a sua validação a essas escalas. Por este motivo, neste estudo simulou-se em modelo numérico, à escala experimental, um caso de erosão de perfil de praia anteriormente reproduzido em modelo físico no LNEC. Simulou-se também o mesmo caso à escala do protótipo, cujos resultados, após reduzidos à escala experimental, foram comparados com os primeiros, ou seja com os resultados numéricos à escala do modelo reduzido. Desta forma, avaliaram-se os efeitos de escala na modelação numérica da erosão de um perfil de praia.

### **1.2 Organização do relatório**

Para além da presente introdução onde se descreve o enquadramento, a motivação e os objetivos do estudo, este relatório divide-se em mais três capítulos, uma lista de referências e três anexos. No capítulo seguinte, capítulo 2, descreve-se a metodologia utilizada, salientando o modelo numérico de morfodinâmica da praia, o caso de estudo, a abordagem metodológica desenvolvida para avaliação dos efeitos de escala na modelação numérica e o critério de avaliação de desempenho do modelo numérico aplicado. No capítulo 3 apresentam-se e discutem-se os resultados das duas fases de aplicação do modelo (às escalas do modelo reduzido e do protótipo) e respetivos processos de calibração, e os resultados da comparação entre ambas as fases, após redução dos resultados do protótipo à escala do modelo reduzido. No capítulo 4 faz-se um sumário do estudo, retiram-se as principais conclusões e fazem-se recomendações.

## 2. Metodologia

### 2.1 Modelo Litprof

O modelo Litprof é um dos cinco modelos numéricos do sistema de modelação Litpack (DHI, 2008), desenvolvido para modelação do transporte de sedimentos não-coesivos devido à ação de ondas e correntes na zona litoral. Trata-se de um modelo morfodinâmico quasi-3D, baseado nos processos físicos costeiros predominantes em praias quasi-uniformes, ou seja, em praias onde a direção da onda incidente pode ser variável mas as isolinhas de profundidade são aproximadamente paralelas à linha de costa (quer isto dizer que os gradientes das condições hidrodinâmicas e sedimentares na direção longitudinal são negligenciáveis).

À semelhança do que acontece com outros processos físicos, a modelação numérica da erosão praia-duna pode caracterizar-se em três tipos de modelos conceptuais: empíricos, semi-empíricos e determinísticos ou baseados em processos. Do primeiro tipo, modelos empíricos, são os modelos onde existe uma relação explícita entre a erosão da praia-duna e importantes parâmetros físicos, que não são quantificados de forma individual mas sim através das consequências, ou seja, volume erodido e recuo da praia-duna. Do segundo tipo, modelos semi-empíricos, são os modelos em que os principais processos físicos são individualmente descritos através de formulações matemáticas. Finalmente os modelos determinísticos, também vulgarmente designados por modelos baseados em processos, são os modelos em que os processos físicos são modelados individualmente. O Litprof é um modelo deste tipo.

O Litprof descreve as alterações morfológicas ocorridas num perfil normal à linha de costa, doravante chamado perfil transversal de praia ou apenas perfil de praia, quando submetido à ação de uma série temporal de agitação marítima e nível do mar (maré e sobrelevação). Trata-se de um modelo numérico constituído por vários sub-modelos dos processos costeiros: um modelo de hidrodinâmica, um modelo quasi-tri-dimensional de transporte de sedimentos e um modelo morfológico (de evolução do fundo) (Figura 1). A abordagem metodológica utilizada é descrita em Oliveira (2001) e DHI (2008). Os processos de transformação da onda considerados são o empolamento, a refração, a dispersão direcional e o decaimento devido à dissipação de energia associada ao atrito de fundo e à rebentação. Os processos decorrentes da progressão da onda em direção à linha de costa considerados como contribuintes para o transporte sedimentar são as assimetrias vertical e horizontal da onda, o fluxo lagrangiano, a corrente de circulação junto à camada limite (*streaming*), a deslocação de massa à superfície gerada pela rebentação (*surface roller*) e a corrente de retorno. Uma vez que não são estimadas as ondas infragravíticas (que resultam de interações harmónicas não lineares de grupos de ondas curtas) (Tucker, 1954), o modelo não considera o escoamento na zona de espraiamento (*wash*), ou seja, a extensão da zona ativa termina na última célula molhada devido à ação conjunta do *setup* (sobrelevação do nível do mar devida à rebentação das ondas) e das ondas curtas (ou gravíticas). O modelo resolve os dois modos de transporte sedimentar, que são o modo de fundo (ou arrastamento) e modo de suspensão. No final de cada passo temporal de cálculo, o modelo atualiza o fundo através da aplicação da equação da continuidade aos sedimentos.

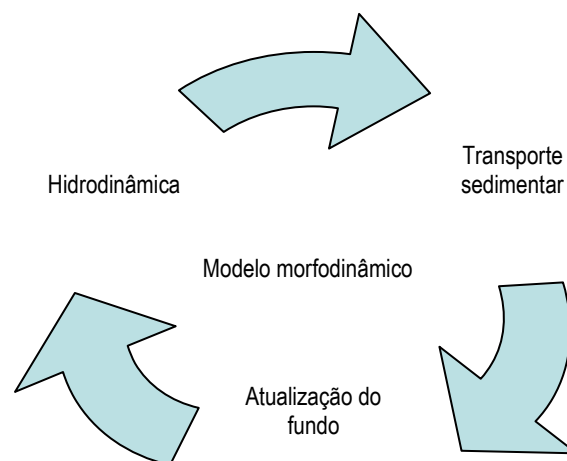


Figura 1 – Esquema simplificado do modelo Litprof.

## 2.2 Caso de estudo

Realizaram-se no LNEC ensaios em modelo reduzido correspondentes a condições de hidrodinâmica, morfologia e sedimentologia semelhantes às condições da praia de Buarcos, Figueira da Foz, localizada na costa central oeste Portuguesa, vastamente estudada e caracterizada anteriormente (Oliveira, 2002; Larangeiro et al., 2003; Freire et al., 2004). Parte destes ensaios, detalhadamente descritos Freire et al. (2008), nomeadamente o ensaio correspondente a este caso de estudo, efetuaram-se na infraestrutura COI2, um canal de ondas irregulares com dimensões 73m x 3m x 2m (comprimento x largura x altura) (Figura 3).



Figura 2 – Vista do bater de ondas irregulares e canal de ondas COI2.

O presente caso de estudo trata-se de um perfil de praia com declive 1:20 e diâmetro mediano  $D_{50}=0.4$  mm, realizado em modelo reduzido à escala 1:6 (Figura 3). O topo de praia é limitado por uma defesa longitudinal aderente, que neste caso em particular, pelo facto do nível da água ter sido considerado igual a 1.0 m, não foi solicitado pela ação das ondas, ou seja, não ocorreu interação onda-estrutura. As condições de onda incidente foram um espectro de Jonswap com  $H_s=0.37$  m,  $T_p=3.27$ s e duração de 12 horas. Para efeitos de simulação numérica considerou-se para perfil inicial o perfil observado ao fim da primeira hora, sendo por isso o período de simulação numérica de 11 horas.



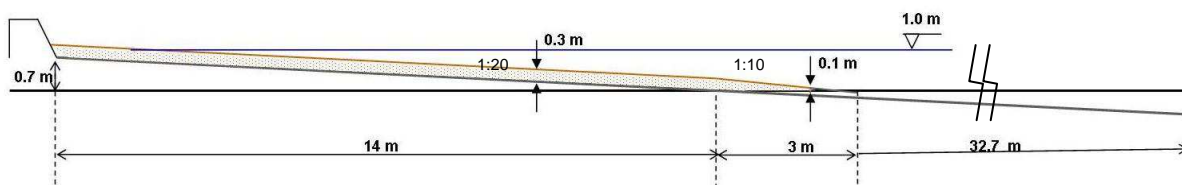


Figura 3 – Esquema do perfil de praia laboratorial inicial no canal de ondas irregulares do LNEC COI2.

Da ação das ondas resultou um perfil do tipo barra fossa, com uma fossa pouco pronunciada (a tender para plataforma), sem que tenha havido interação da água com a estrutura (Figura 4). O nível da água parada corresponde à coordenada vertical  $z$  igual a zero. Salienta-se ainda que durante a experiência laboratorial ocorreram fugas de sedimento do perfil para o canal (fora da zona de monitorização).

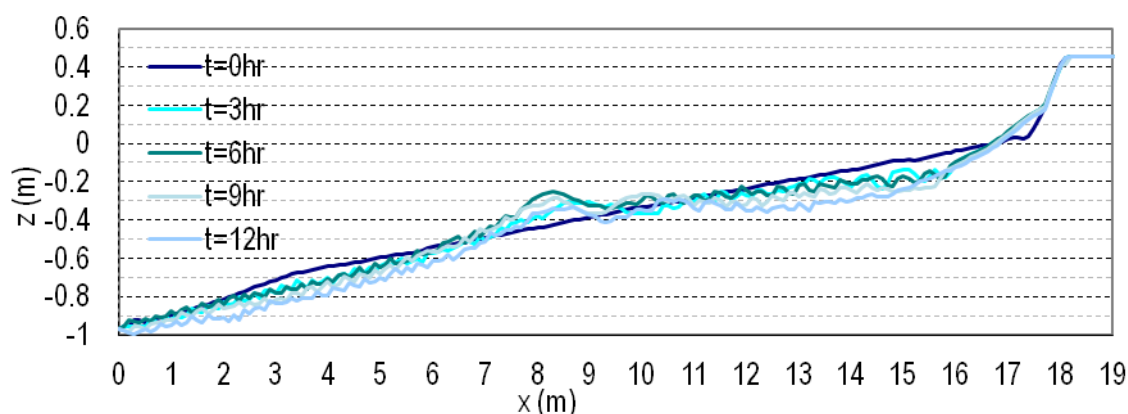


Figura 4 - Evolução do perfil para o caso de estudo (envelope da observação experimental).

Nos ensaios em modelo reduzido foram consideradas as seguintes condições de redução de escala (Freire et al, 2008):

- para os processos de hidrodinâmica considerou-se o modelo não distorcido, ou seja, aplicou-se uma única escala de comprimento para todas as variáveis ( $n_H = n_L = n_h$ ; onde  $n$  representa a relação de escala protótipo-modelo e os índices significam altura de onda,  $H$ , comprimento de onda,  $L$ , e profundidade,  $h$ ); e considerou-se a existência de similaridade do número de Froude ( $Fr=U/(gh)^{1/2}$ ; onde  $U$  é a velocidade característica do escoamento e  $g$  a aceleração gravítica) entre o modelo e o protótipo.

- para os processos sedimentares aplicou-se a relação de escalas  $n_{D50} = nh^{0.56}$ , onde  $n_{D50}$  e  $nh^{0.56}$  são as relações de escala do diâmetro mediano dos sedimentos e da profundidade.

As relações de escala de velocidade,  $U$ , e de tempo,  $T$ , resultaram em  $n_U = n_T = (n_L)^{0.5} = (n_h)^{0.5}$ .

## 2.3 Abordagem metodológica

Com vista à avaliação dos efeitos de escala na modelação numérica deste caso de erosão de um perfil de praia, utilizou-se uma abordagem metodológica baseada na seguinte sucessão de procedimentos:

### 1. Simulação numérica do caso de estudo à escala do modelo reduzido

#### 1.1. Aplicação do modelo com os parâmetros por defeito

#### 1.2. Calibração do modelo

2. Simulação numérica do caso de estudo à escala do protótipo
  - 2.1. Aplicação do modelo com os parâmetros por defeito
  - 2.2. Calibração do modelo
3. Comparação dos resultados numéricos obtidos às escalas do modelo reduzido e do protótipo, após redução dos resultados obtidos à escala do protótipo para a escala do modelo reduzido

A aplicação deste tipo de modelos morfodinâmicos baseados nos processos físicos requer um elevado número de parâmetros (de condições de onda, de escoamento, de transporte, de morfodinâmica, de fronteira e de estabilidade numérica), cujo valor a utilizar deve corresponder às condições físicas locais. Frequentemente, em projetos de engenharia, é inviável a medição direta de muitos destes parâmetros. Nestas circunstâncias, o procedimento que vulgarmente se utiliza é ou aplicar valores usados em casos de estudo com condições físicas semelhantes relatados em literatura, ou aplicar os parâmetros por defeito, recomendados pelos autores dos modelos, que foram definidos como sendo aqueles que melhor representam a mais alargada gama de condições físicas possível (previamente testado).

Neste estudo, em ambas as fases de aplicação do modelo, de simulação à escala do modelo reduzido e de simulação à escala do protótipo, fez-se uma aplicação prévia com os parâmetros por defeito. Descrevem-se na Tabela 1 os principais parâmetros de calibração do modelo Litprof, assim como os valores atribuídos por defeito. Posteriormente, também em ambas as fases de aplicação do modelo, procedeu-se à calibração, ou seja, ajustaram-se parâmetros de forma a melhorar o desempenho do modelo, i.e., a similaridade com os resultados observados. Testaram-se os parâmetros de calibração assinalados na Tabela 1, tendo como base os parâmetros por defeito. Neste processo, fez-se variar um parâmetro de cada vez mantendo os outros constantes.

Tabela 1 – Principais parâmetros de calibração do modelo Litprof.

	Parâmetro <sup>1</sup>	Descrição [unidades]	Valor por defeito	Outros valores testados
Condições de transporte (Módulo PRFTABL)	C1	Parâmetro de descrição das rugas de fundo [-]	0.1	
	C2	Parâmetro de descrição das rugas de fundo [-]	2	
	C3	Parâmetro de descrição das rugas de fundo [-]	16	
	C4	Parâmetro de descrição das rugas de fundo [-]	3	
	$\theta_c$	Parâmetro crítico de Shields [-]	0.045	
	Convective terms	Opção inclusão da corrente de fundo ( <i>streaming</i> ) [-]	included	
	$C_b$	Opção de cálculo da concentração de fundo (modelo determinístico de Engelund and Fredsøe (1976) ou empírico de Zyserman e Fredsoe (1994)) [-]	deterministic	

Condições de onda	$\gamma_1$	Máxima razão entre a altura e o comprimento de onda ( $H/L$ ) [-]	0.88	0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1
	$\gamma_2$	Máxima razão entre a altura de onda e a profundidade ( $H/h$ ) [-]	0.6	0, 0.4, 0.8, 1
	$\beta$	Parâmetro empírico do modelo de turbulência superficial de Dally e Brown (1995) ( $>0.1$ e $<0.2$ ) [-]	0.15	0.1, 0.2
Condições de morfodinâmica	Maximum Morphological Timestep	Limite máximo do intervalo de tempo entre atualizações da batimetria, sendo o passo de cálculo do estimado automaticamente [s]	1800	
	Maximum Angle of Bed Slope ou max angle	Máximo declive de fundo antes de avalanche submersa [°]	30	10, 15, 20
	$\alpha_{scale}$ ou scale parameter	Fator de transferência de momento transversal (afeta a forma da barra submersa) [-]	1	0.8, 1.2
	Clay layer	Opção de inclusão de um fundo rígido abaixo de determinado nível (ao qual pode ocorrer acumulação mas não erosão) [-]	exclui	
	Energy loss due to bed friction	Opção de inclusão de dissipação de energia por atrito de fundo segundo o modelo de Fredsøe e Deigaard (1992) [-]	inclui	

<sup>1</sup> designação de acordo com a nomenclatura das variáveis na interface do modelo

Neste modelo numérico os principais parâmetros de calibração são os parâmetros de rebentação da onda  $\gamma_1$  e  $\gamma_2$ , o parâmetro de turbulência  $\beta$ , o parâmetro máximo ângulo de fundo submerso estável (*Maximum Angle of Bed Slope*) e o parâmetro de escala  $\alpha_{scale}$ .

Os parâmetros  $\gamma_1$  e  $\gamma_2$  são considerados na estimativa da máxima altura de onda,  $H_{max}$ , que por sua vez é necessária para estimar a energia dissipada segundo Battjes e Janssen (1978). Eles são considerados na formulação seguinte

$$H_{max} = \frac{\gamma_1}{\gamma_2} \tanh\left(\frac{\gamma_2 kh}{\gamma_1}\right) \quad (1)$$

onde  $k$  é o número de onda e  $h$  a profundidade. O parâmetro de rebentação  $\gamma_1$  descreve a máxima declividade da onda,  $H/L$ . O parâmetro de rebentação  $\gamma_2$  é, segundo Battjes e Stive (1984) calculado da seguinte forma

$$\gamma_2 = 0.5 + 0.4 \tanh(33s_0) \quad (2)$$

onde  $s_0$  é o declive de onda ao largo,  $H/L_0$ , onde  $L_0$  é o comprimento de onda ao largo.

O parâmetro  $\beta$  é um parâmetro empírico que descreve a relação entre a taxa de energia dissipada e a área da turbulência superficial, através da equação da turbulência superficial (Dally and Brown, 1995), dada por

$$\frac{d}{dx}(E_f \cos \alpha) + \frac{d}{dx}\left(\frac{1}{2}\rho_r c^2 \frac{A}{T} \cos \alpha\right) = \rho_r g \beta \frac{A}{T} \quad (3)$$

onde  $E_f$  é o fluxo de energia da onda,  $\alpha$  é o ângulo de incidência da onda,  $\rho_r$  é a densidade do rolo de turbulência, incluindo os turbilhões de ar,  $A$  é a área da superfície do rolo de turbulência,  $T$  é o período médio e  $g$  é a aceleração gravítica. Este parâmetro adimensional foi definido com base em experiências laboratoriais realizadas com ondas regulares (Dally e Brown, 1995). O valor recomendado é 0.15, independentemente de se considerarem ondas regulares ou irregulares.

O parâmetro *Maximum Angle of Bed Slope* é, tal como o nome indica, o máximo declive de fundo antes de avalanche submersa, ou seja, o máximo ângulo de fundo submerso estável.

O parâmetro  $\alpha_{scale}$  é um coeficiente de difusão horizontal que afeta a forma de desenvolvimento das barras. É um parâmetro associado à variação de momento horizontal e é proporcional a uma escala de comprimento característica à qual o transporte é suavizado (DHI, 2008). O comprimento das barras aumenta com o aumento do valor deste parâmetro.

Fez-se variar cada um destes parâmetros de cada vez relativamente à situação *default* (com os parâmetros por defeito). Testou-se o modelo para os valores: 0.6, 0.7, 0.8, 0.9 e 1 de  $\gamma_1$ ; 0, 0.4, 0.8 e 1 de  $\gamma_2$ ; 0.1 e 0.2 de  $\beta$ ; 10, 15 e 20° de *Maximum Angle of Bed Slope*; e 0.8 e 1.2 de  $\alpha_{scale}$  (Tabela 1).

## 2.4 Avaliação de resultados

Para avaliar os resultados numéricos, para além da observação da similaridade entre previsões e medições da grandeza em causa ao longo do perfil de praia, utilizou-se um parâmetro estatístico adequado à principal variável a analisar, que é a profundidade. Utilizou-se o parâmetro *Brier Skill Score* (BSS) de van Rijn *et al.* (2003), que compara previsões ( $z_{b,c}$ ) e medições de perfil ( $z_{b,m}$ ) com o perfil inicial ( $z_{b,0}$ ) e tem em conta o erro de medição  $\partial$  (que aqui se assumiu nulo). Define-se por

$$BSS = 1 - \frac{\langle (|z_{b,c} - z_{b,m}| - \partial)^2 \rangle}{\langle (z_{b,0} - z_{b,m})^2 \rangle} \quad (4)$$

onde os parêntesis angulares denotam a média.

Apresenta-se na Tabela 2 a classificação do desempenho de modelos morfodinâmicos proposta por van Rijn *et al.* (2003) e Sutherland *et al.* (2004).

Tabela 2 - Classificação proposta por van Rijn *et al.* (2003) e Sutherland *et al.* (2004).

	<b>BSS (van Rijn et al., 2003)</b>	<b>BSS (Sutherland et al., 2004)</b>
Excelente	1.0 - 0.8	1.0 - 0.5
Bom	0.8 - 0.6	0.5 - 0.2
Razoável	0.6 - 0.3	0.2 - 0.1
Fraco	0.3 - 0.0	0.1 - 0.0
Mau	< 0.0	< 0.0

### 3. Resultados e discussão

#### 3.1 Modelação numérica à escala do modelo reduzido

##### 3.1.1 Resultados default

Apresentam-se na Figura 5 os resultados obtidos ao fim de 11 horas para a variável batimetria. Os resultados numéricos com os parâmetros por defeito ao final de 11 horas mostram que ocorre erosão, bastante acentuada, da zona de face de praia (entre  $x=16\text{m}$  e  $x=18\text{m}$ ), processo que não se verificou na experiência laboratorial, onde a zona que efetivamente erodiu se localiza a 11-17m de distância à origem da abcissa do sistema de coordenadas do perfil. Consequentemente, o modelo simula um recuo ao nível da linha de água com cerca de 1m que não foi observado.

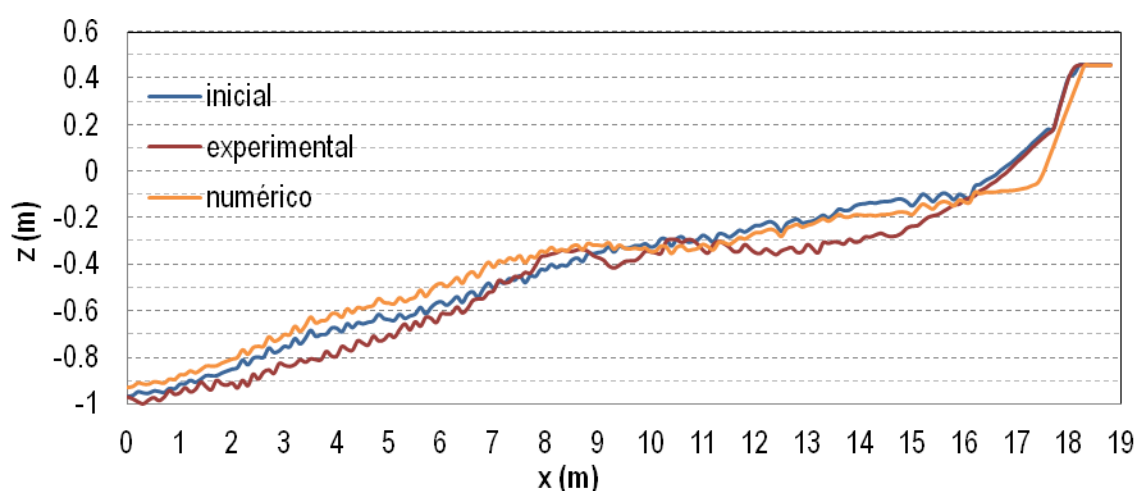


Figura 5 – Resultados experimentais e numéricos para o caso default da evolução do perfil ao fim de 11 horas.

Apresentam-se no Anexo A os resultados numéricos obtidos para a evolução dos parâmetros altura de onda média quadrática ( $H_{rms}$ ), nível da água e transporte sedimentar (instantâneo e integrado).

##### 3.1.2 Calibração

Testaram-se os 5 parâmetros de calibração para os valores assinalados na Tabela 1. Dos parâmetros testados (resultados nas Figuras 6 a 11), aquele que causou maiores alterações ao resultado obtido com os parâmetros por defeito foi o  $\gamma_2$ . A alteração de  $\gamma_2$  de 0.6 para 0.4 foi o procedimento que permitiu obter melhor similaridade entre resultados numéricos e experimentais. O BSS (Tabela 3) passou de -0.74 para -0.25, como se pode observar na Tabela 3. Verificou-se assim que o parâmetro  $\gamma_2$  foi o mais eficaz na calibração do modelo à escala reduzida.

Por forma a tentar aproximar o resultado da altura de onda ao experimental, realizaram-se dois outros testes em que se testaram os parâmetros  $\gamma_1$  e  $\gamma_2$  simultaneamente. Consideraram-se dois casos: ambos os parâmetros iguais a 1, e o  $\gamma_1$  igual a 0.6 e o  $\gamma_2$  igual a 1. Os resultados são mostrados na Figura 8.

Testes do gamma 1:

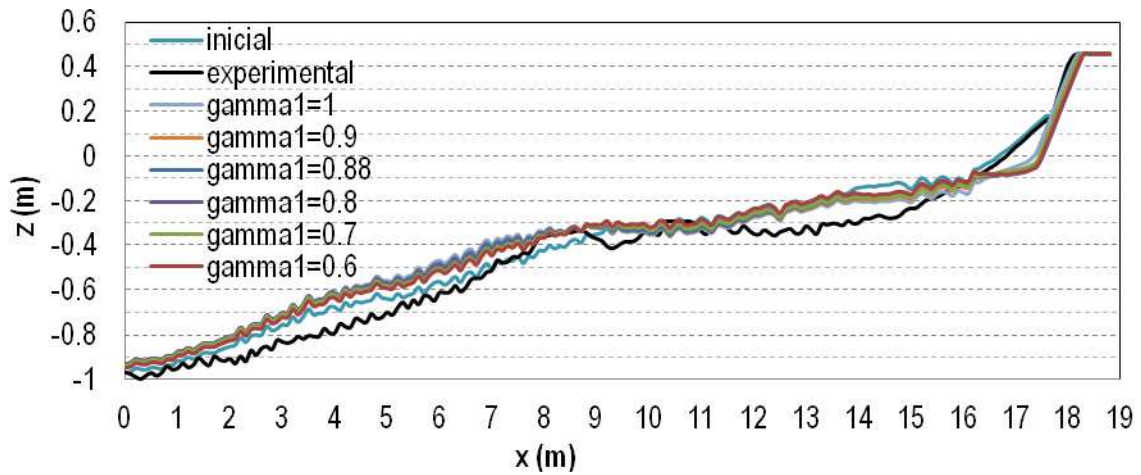


Figura 6 - Resultados da evolução do perfil ao fim de 11 horas. Teste ao parâmetro gamma1.

Testes do gamma 2:

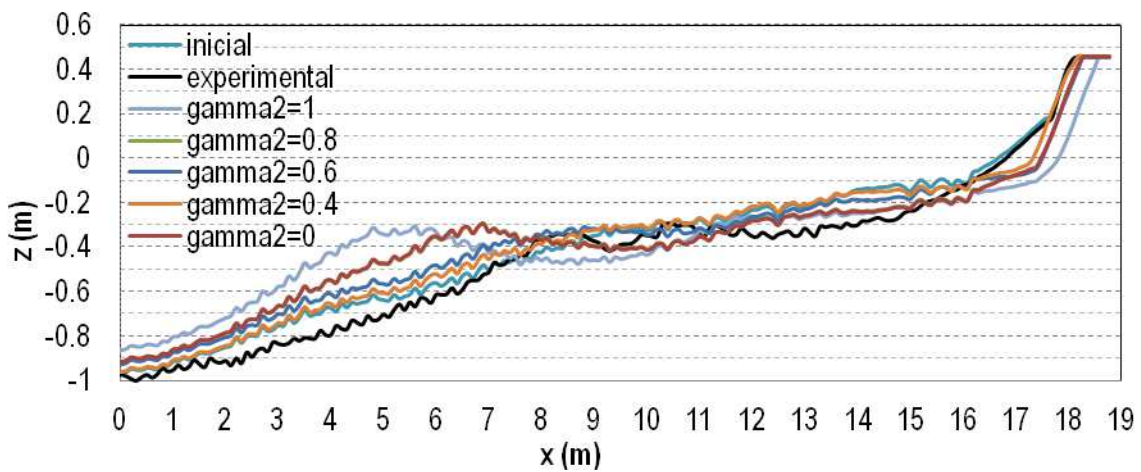


Figura 7 - Resultados da evolução do perfil ao fim de 11 horas. Teste ao parâmetro gamma2.

Testes do gamma1 e gamma2 combinados:

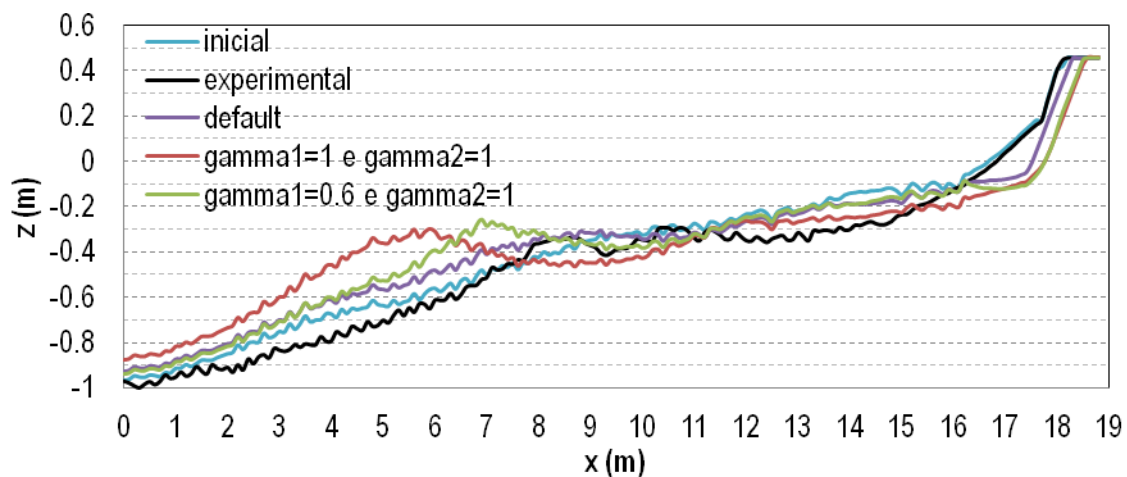


Figura 8 - Resultados da evolução do perfil ao fim de 11 horas. Teste aos parâmetros gamma1 e gamma2 combinados.

Testes do beta:

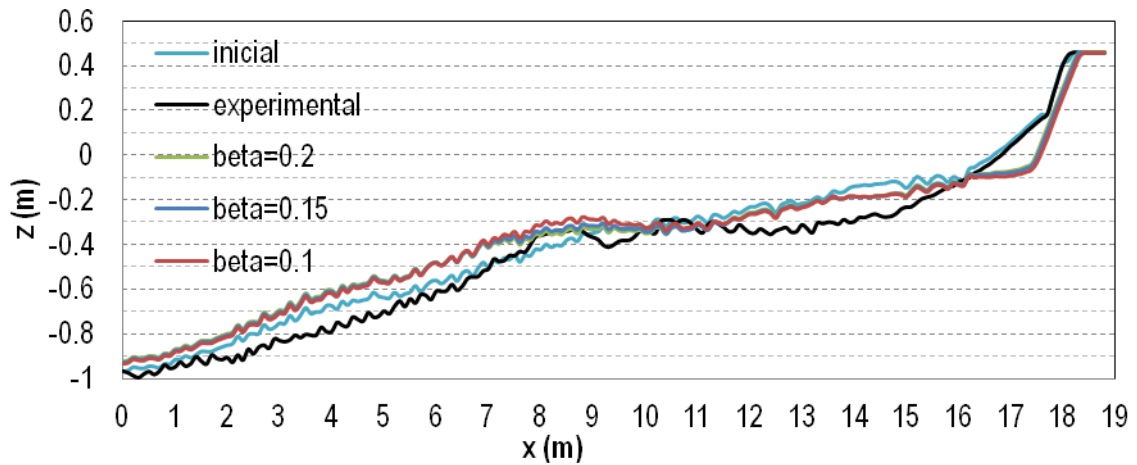


Figura 9 - Resultados da evolução do perfil ao fim de 11 horas. Teste ao parâmetro beta.

Testes do max angle:

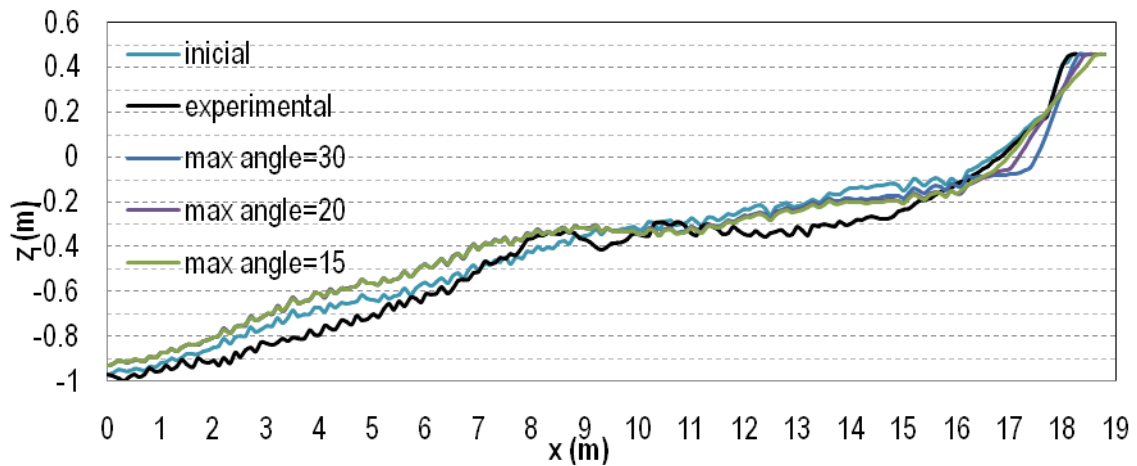


Figura 10 - Resultados da evolução do perfil ao fim de 11 horas. Teste ao parâmetro max angle.

Testes do scale parameter:

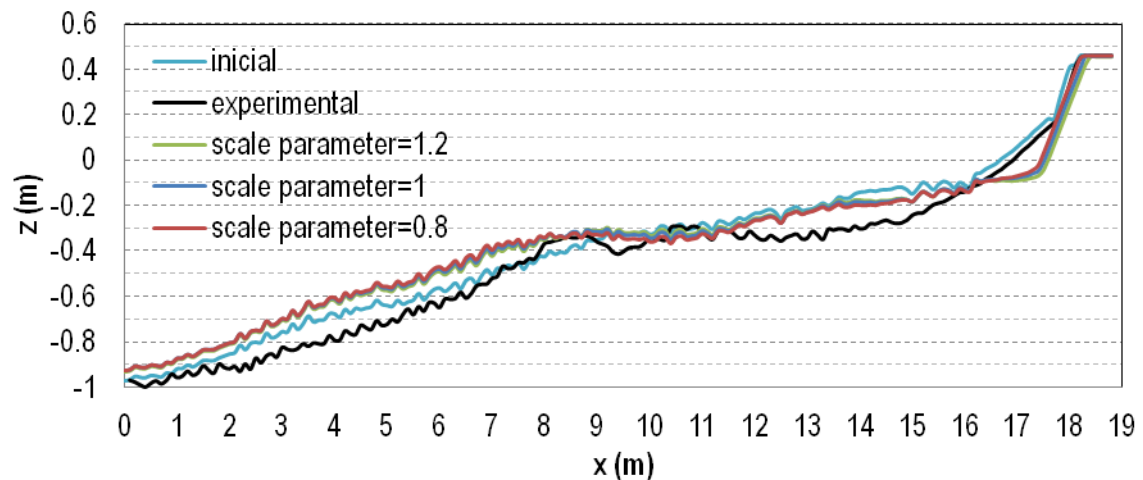


Figura 11 - Resultados da evolução do perfil ao fim de 11 horas. Teste ao parâmetro scale parameter.

Tabela 3 – Valores de BSS obtidos nos testes realizados com escala do modelo reduzido.

	<b>Brier Skill Score (BSS)</b>
default	-0.74463949
gamma1=0.6	-0.52890481
gamma1=0.7	-0.4947859
gamma1=0.8	-0.59248044
gamma1=0.88 (default)	-0.74463949
gamma1=0.9	-0.66677153
gamma1=1	-0.58918105
gamma2=0	-2.18631547
gamma2=0.4	-0.25224333
gamma2=0.6 (default)	-0.74463949
gamma2=0.8	-2.09627158
gamma2=1	-5.04863029
beta=0.1	-0.80300631
beta=0.15 (default)	-0.74463949
beta=0.2	-0.74766025
max angle=15	-0.47932666
max angle=20	-0.53249279
max angle=30 (default)	-0.74463949
scale parameter=0.8	-0.71215472
scale parameter=1 (default)	-0.74463949
scale parameter=1.2	-0.84498932
gamma2=1 e gamma1=0.6	-2.0350714
gamma2=1 e gamma1=1	-4.39804064

Apresentam-se no Anexo A os resultados numéricos dos parâmetros altura de onda média quadrática (Hrms), nível da água e transporte sedimentar (instantâneo e integrado), obtidos para os testes de calibração dos parâmetros gamma1, gamma2, beta, max angle e scale parameter.



## 3.2 Modelação numérica à escala do protótipo

### 3.2.1 Resultados default

O modelo com os parâmetros por defeito reproduz alterações insignificantes no perfil de praia, ou seja, não simula o processo de erosão observado na parte superior do perfil submerso, como pode ser constatado na Figura 12.

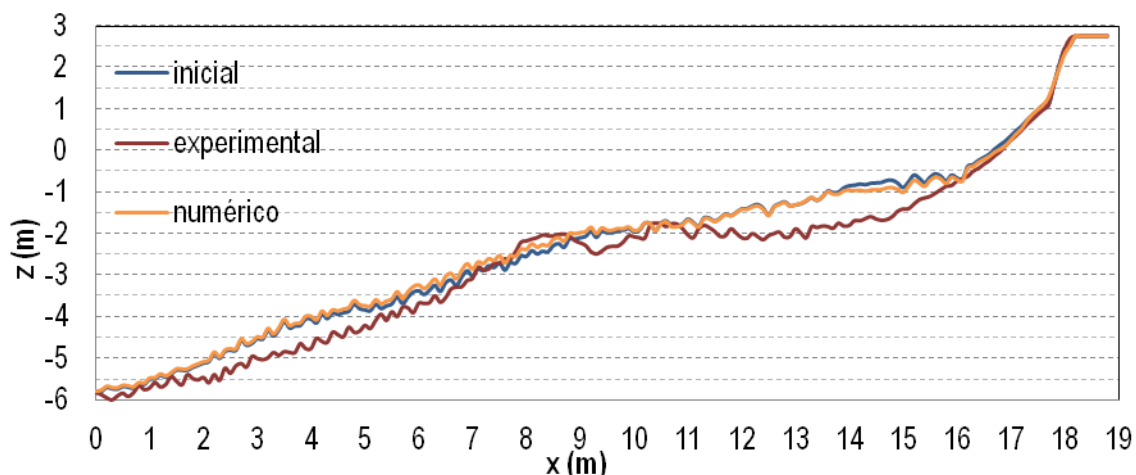


Figura 12 - Resultados experimentais e numéricos para o caso default da evolução do perfil de praia ao fim de 11 horas.

Apresentam-se no Anexo B os resultados numéricos obtidos para a evolução dos parâmetros altura de onda média quadrática ( $H_{rms}$ ), nível da água e transporte sedimentar (instantâneo e integrado).

### 3.2.2 Calibração

Tal como no caso de aplicação do modelo à escala reduzida, testaram-se os 5 parâmetros de calibração para os valores assinalados na Tabela 1 (resultados nas Figuras 13 a 17). À semelhança do verificado na aplicação do modelo numérico à escala do modelo reduzido, o parâmetro de calibração que causou maiores modificações do perfil de praia relativamente ao resultado obtido com os parâmetros por defeito foi o  $\gamma_2$ . Contudo, para todos os valores de  $\gamma_2$  testados, com a exceção do valor por defeito, 0.6, o parâmetro  $\gamma_2$  causou erosão da zona da face de praia (à semelhança dos resultados das simulações numéricas realizadas à escala dos resultados do modelo reduzido). Com base no indicador de erro BSS (Tabela 4), foi o parâmetro de calibração scale parameter igual a 0.8 que permitiu obter o melhor resultado do perfil à escala do protótipo.

### Testes do gamma1:

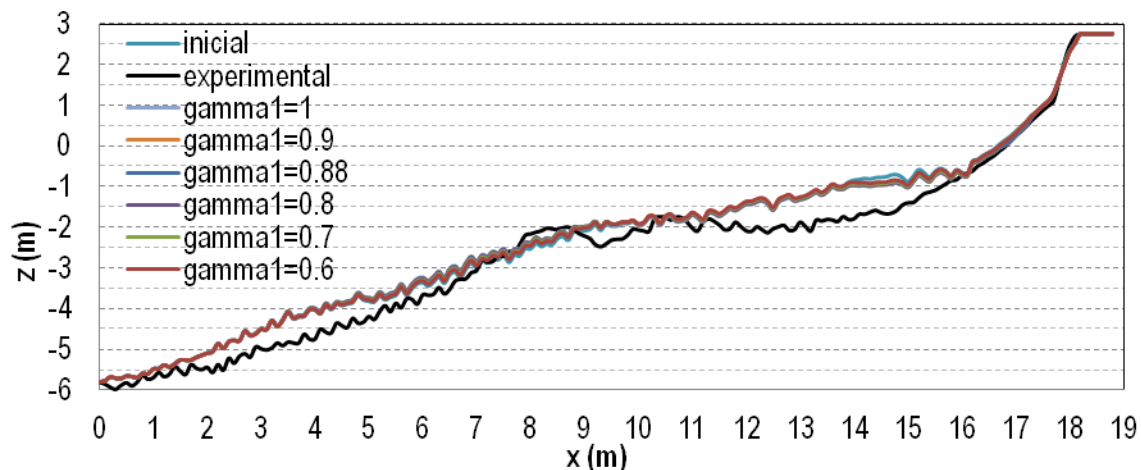


Figura 13 - Resultados da evolução do perfil ao fim de 11 horas. Teste ao parâmetro gamma1.

### Testes do gamma2:

Relativamente aos testes do parâmetro  $\gamma_2$ , não se apresentam os resultados do teste de  $\gamma_2=0.4$  por serem irrealistas.

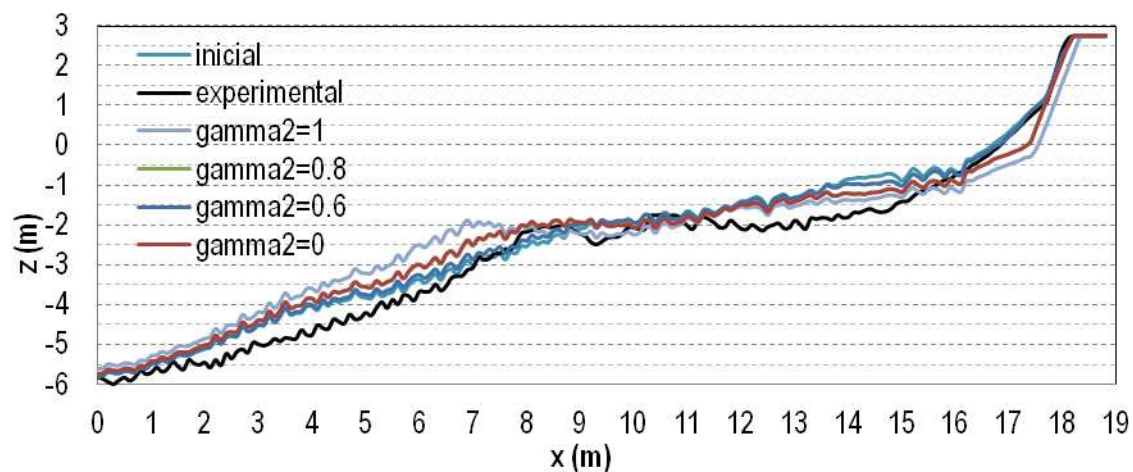


Figura 14 - Resultados da evolução do perfil ao fim de 11 horas. Teste ao parâmetro gamma2.

Testes do beta:

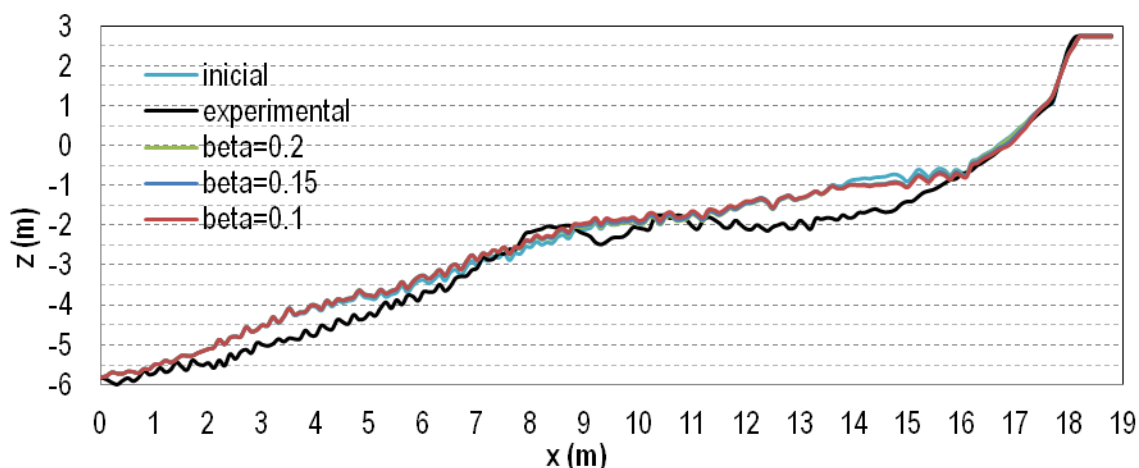


Figura 15 - Resultados da evolução do perfil ao fim de 11 horas. Teste ao parâmetro beta.

Testes do max angle:

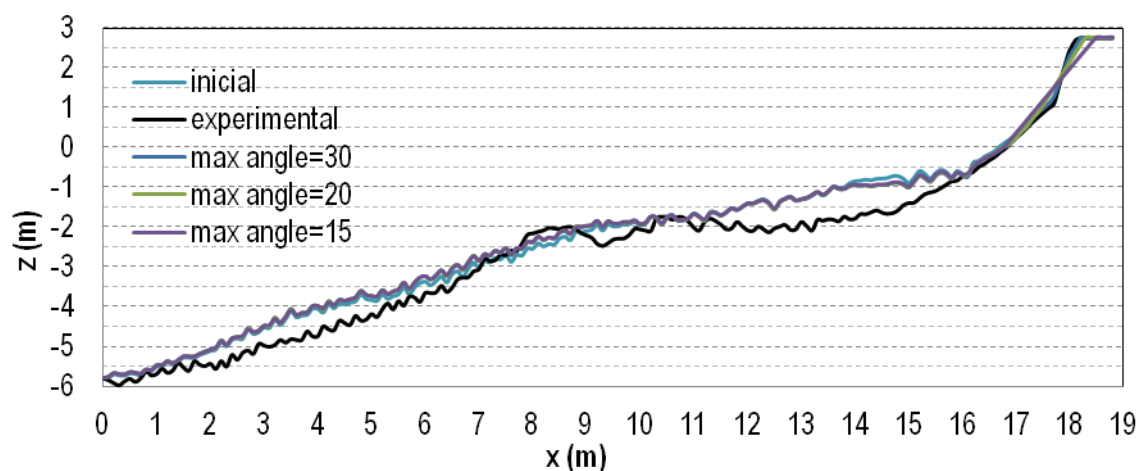


Figura 16 - Resultados da evolução do perfil ao fim de 11 horas. Teste ao parâmetro max angle.

Testes do scale parameter:

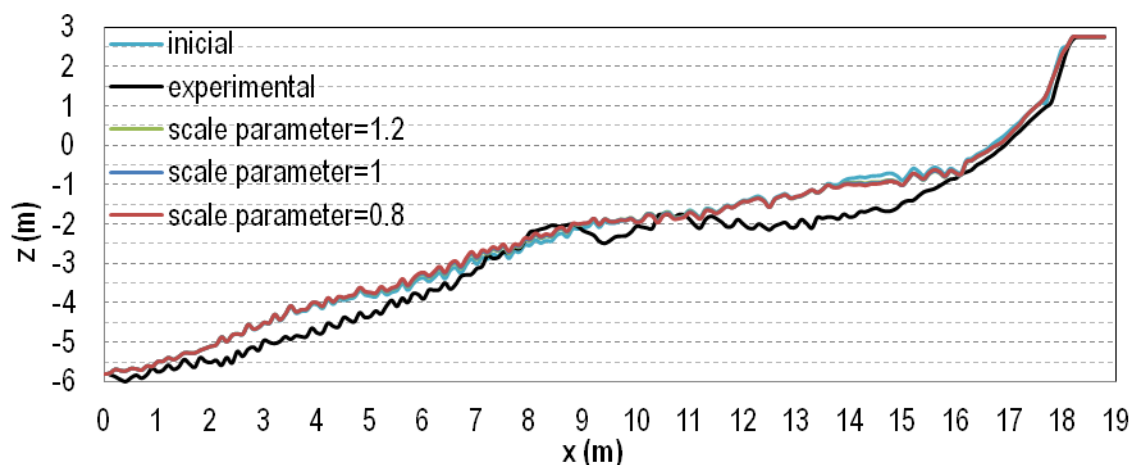


Figura 17 - Resultados da evolução do perfil ao fim de 11 horas. Teste ao parâmetro scale parameter.

Tabela 4 - Valores de BSS obtidos nos testes realizados com escala do protótipo.

	<b>Brier Skill Score (BSS)</b>
default	0.0435237
gamma1=0.6	0.00783742
gamma1=0.7	0.03489987
gamma1=0.8	0.0498558
gamma1=0.88 (default)	0.0435237
gamma1=0.9	0.04486057
gamma1=1	0.04827256
gamma2=0	-0.2039615
gamma2=0.6 (default)	0.0435237
gamma2=0.8	-0.1843854
gamma2=1	-1.1820075
beta=0.1	0.04767063
beta=0.15 (default)	0.0435237
beta=0.2	0.04171284
max angle=15	0.00765718
max angle=20	0.03348521
max angle=30 (default)	0.0435237
scale parameter=0.8	0.05374945
scale parameter=1 (default)	0.0435237
scale parameter=1.2	0.03333002

Apresentam-se no Anexo B os resultados numéricos dos parâmetros altura de onda média quadrática (Hrms), nível da água e transporte sedimentar (instantâneo e integrado), obtidos para os testes de calibração dos parâmetros gamma1, gamma2, beta, max angle e scale parameter.

### 3.3 Comparação entre resultados numéricos à escala do modelo reduzido e do protótipo

#### 3.3.1 Resultados default

A aplicação do modelo numérico com os parâmetros por defeito a ambas as escalas (Figura 18) mostrou que o modelo só simulou erosão do perfil de praia à escala reduzida e que a erosão do perfil de praia simulada ocorreu acima da erosão observada (que foi a parte superior do perfil submerso), ou seja, na zona da face de praia (tendo em conta que o nível da água parada se verifica para  $z$  igual a zero). O indicador de erro BSS aponta para um melhor desempenho do modelo numérico com os parâmetros por defeito à escala do protótipo do que à escala reduzida (Tabelas 3 e 4). Contudo, com base na classificação de van Rijn et al (2003), salienta-se que no primeiro caso o resultado é mau e no segundo é fraco, porque o processo de erosão do perfil é sobrestimado e subestimado respetivamente. Contudo, na avaliação do desempenho do modelo numérico, deve ter-se em consideração que a fuga de sedimento da parte inferior do perfil de praia submerso para a plataforma do canal (fora da zona de monitorização), observada durante o ensaio laboratorial mas não quantificada, deverá ter contribuído para diminuir a similaridade entre os resultados numéricos e experimentais, ou seja, para diminuir a classificação do desempenho do modelo.

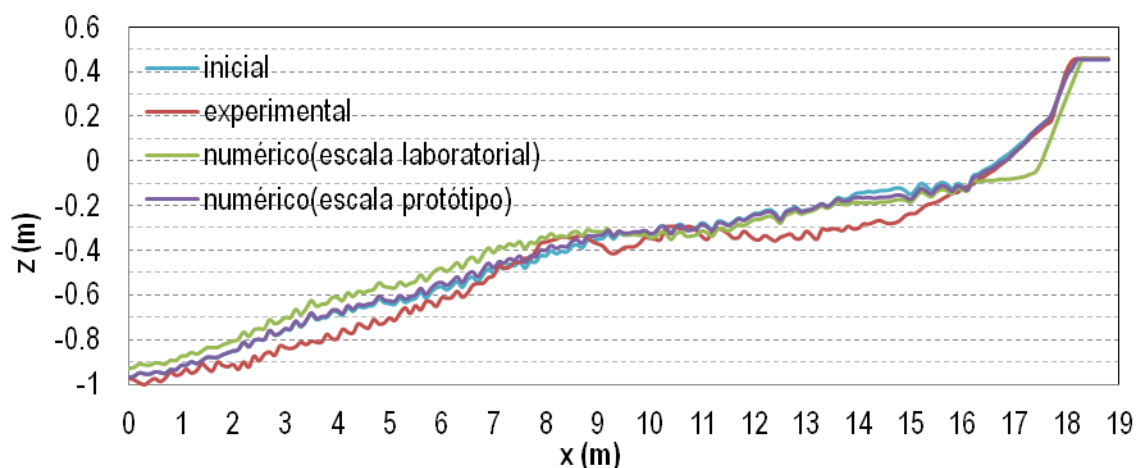


Figura 18 – Comparação entre os resultados experimentais e os resultados numéricos (à escala laboratorial e à escala do protótipo) para o caso default da evolução do perfil ao fim de 11 horas.

Apresentam-se no Anexo C os resultados numéricos do parâmetro altura de onda média quadrática (Hrms) para os testes com os parâmetros por defeito.

### 3.3.2 Calibração

Compararam-se os resultados obtidos a ambas as escalas, do modelo reduzido e do protótipo, para cada um dos melhores casos dos cinco parâmetros de calibração (Figuras 19 a 23). A avaliação de cada um dos melhores casos baseou-se na análise conjunta da similaridade entre os perfis numérico e experimental e do indicador de erro BSS (Tabelas 3 e 4). Verificou-se que, com exceção do parâmetro de calibração scale parameter, para o qual se obteve o melhor valor 0.8, nenhum dos parâmetros de calibração tem valores coincidentes para os melhores casos a ambas as escalas. Para as escalas reduzida e protótipo, respetivamente, obtiveram-se os seguintes melhores valores: 1 e 0.8 para o parâmetro gamma1; 0.4 e 0.6 (o parâmetro por defeito), para o parâmetro gamma2; 0.15 (o parâmetro por defeito) e 0.1 para o parâmetro beta; 20 e 30 (o parâmetro por defeito) para o max angle. Também se verificou que o parâmetro de calibração que permitiu obter os melhores resultados a ambas as escalas não foi o mesmo: no caso à escala reduzida foi o parâmetro gamma2 (para BSS igual a -0.25); no caso à escala do protótipo foi o parâmetro scale parameter (para BSS igual a 0.05). Estes resultados permitem concluir que a calibração do modelo numérico depende da escala de aplicação.

Tal como no caso de aplicação do modelo com os parâmetros por defeito, o indicador de erro BSS (Tabelas 3 e 4) aponta para um melhor desempenho do modelo numérico calibrado à escala do protótipo do que à escala reduzida. Contudo, mantém-se o fato do processo de erosão do perfil ser sobrestimado à escala reduzida e subestimado à escala do protótipo.

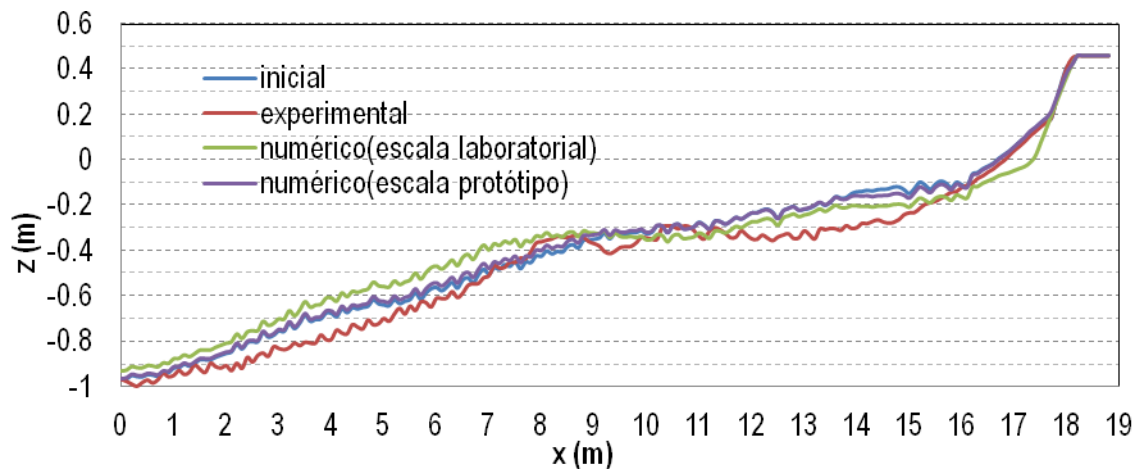


Figura 19 - Comparação entre os resultados experimentais e os resultados numéricos (à escala laboratorial e à escala do protótipo) da calibração do parâmetro gamma1 para a evolução do perfil ao fim de 11 horas.

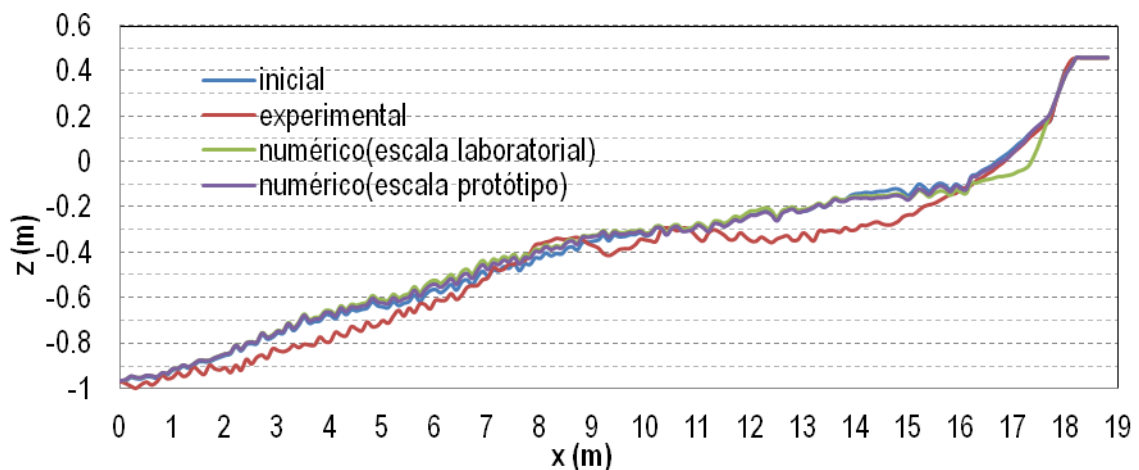


Figura 20 - Comparação entre os resultados experimentais e os resultados numéricos (à escala laboratorial e à escala do protótipo), da calibração do parâmetro gamma2 para a evolução do perfil ao fim de 11 horas.

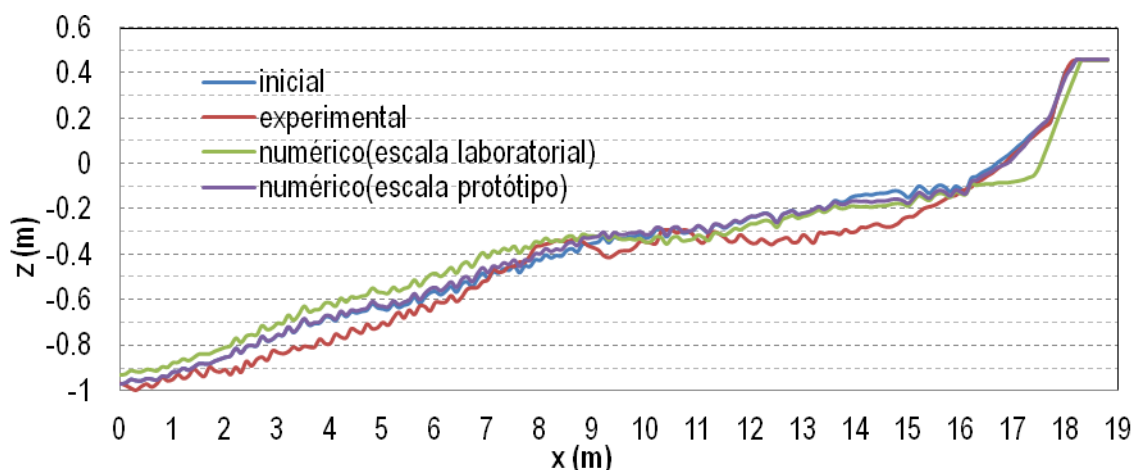


Figura 21 - Comparação entre os resultados experimentais e os resultados numéricos (à escala laboratorial e à escala do protótipo), da calibração do parâmetro beta para a evolução do perfil ao fim de 11 horas.

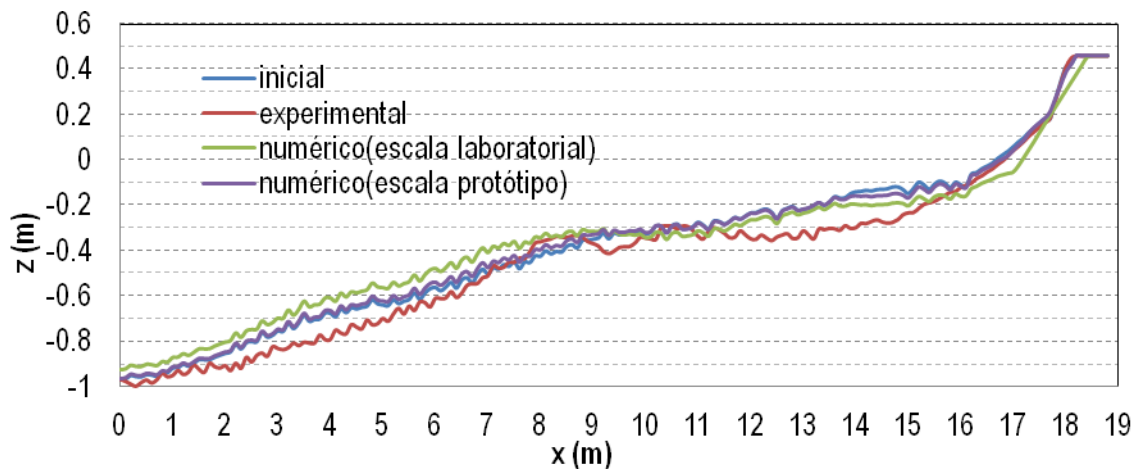


Figura 22 - Comparação entre os resultados experimentais e os resultados numéricos (à escala laboratorial e à escala do protótipo), da calibração do parâmetro max angle para a evolução do perfil ao fim de 11 horas.

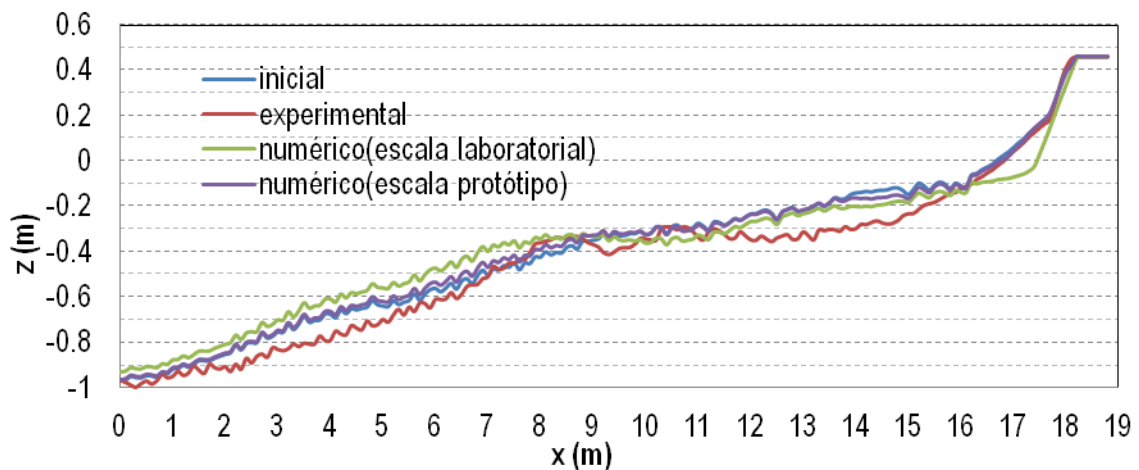


Figura 23 - Comparação entre os resultados experimentais e os resultados numéricos (à escala laboratorial e à escala do protótipo), da calibração do parâmetro scale parameter para a evolução do perfil ao fim de 11 horas.

Apresentam-se no Anexo C os resultados numéricos do parâmetro altura de onda média quadrática (Hrms) para os testes de calibração dos parâmetros gamma1, gamma2, beta, max angle e scale parameter.

## 4. Conclusão

Este estudo teve como objetivo validar um modelo numérico de morfodinâmica de praias a curto prazo a diferentes escalas (escalas do modelo reduzido e do protótipo) e avaliar os efeitos de escala na modelação numérica. Para concretizar este objetivo realizaram-se ensaios laboratoriais, em canal de ondas irregulares, para simular a erosão de um perfil da praia de Buarcos, Figueira da Foz, que foram reproduzidos em modelo numérico à escala laboratorial e à escala do protótipo. Numa primeira fase, os resultados de ambas as aplicações foram validados com os resultados experimentais. Numa segunda fase, após reduzidos à escala laboratorial, os resultados numéricos à escala do protótipo foram comparados com os resultados numéricos à escala laboratorial. A avaliação do desempenho do modelo numérico baseou-se na observação da similaridade entre previsões (resultados numéricos) e medições (resultados experimentais) e no indicador de erro BSS, que foi calculado para cada teste. Nas aplicações do modelo numérico, em ambas as escalas, realizaram-se testes com os parâmetros por defeito recomendados pelos autores do modelo e posteriormente executou-se a calibração.

Concluiu-se que o processo de erosão do perfil de praia foi sobrestimado à escala reduzida e subestimado à escala do protótipo, quer na aplicação do modelo com os parâmetros por defeito, quer na aplicação do modelo calibrado. O indicador de erro BSS aponta para um melhor desempenho do modelo numérico à escala do protótipo do que à escala reduzida, sendo que, com base na classificação de van Rijn et al (2003), no primeiro caso o desempenho é mau e no segundo é fraco. Contudo, salienta-se que a fuga de sedimento da parte inferior do perfil de praia para o interior na plataforma do canal (fora da zona de monitorização) deverá ter contribuído de forma relevante para os resultados pessimistas do desempenho do modelo numérico.

Concluiu-se também que o parâmetro de calibração mais influente na modificação do perfil de praia a ambas as escalas foi o parâmetro  $\gamma_2$ , mas que só no caso do modelo à escala laboratorial este foi o parâmetro de calibração mais eficaz. No caso do modelo à escala do protótipo, o scale parameter foi o parâmetro de calibração mais eficaz.

Do processo de calibração a ambas as escalas, concluiu-se ainda que, com exceção do parâmetro de calibração scale parameter, nenhum dos restantes parâmetros de calibração tem valores coincidentes em ambas as escalas.

Como conclusão final, constatou-se que existem efeitos de escala na simulação numérica da erosão de um perfil de praia com o modelo Litprof.

Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, I.P., agosto de 2012.

### VISTOS

Luis Ivens Portela  
Chefe do Núcleo de  
Estuários e Zonas Costeiras

Rafaela de Saldanha Matos  
Directora do Departamento de  
Hidráulica e Ambiente

### AUTORIA

Joana Ferraz Contente  
Colaboradora do LNEC  
Licenciada em Ciências do Mar

Filipa S. B. F. Oliveira  
Investigadora Auxiliar



## 5. Referências

Battjes, J.A. and Stive, M.J.F., 1984. Calibration and verification of a dissipation model for random breaking waves, *Coastal Eng.* pp. 649-660.

Battjes, J.A., and Janssen, J.P.F.M., 1978. Energy Loss and Set-Up due to Breaking of Random Waves. *Proc. of the 16th Int. Conf. on Coastal Eng.* pp. 569-587, Hamburg.

Dally, W.R. and Brown, C.A., 1995. A modeling investigation of the breaking wave roller with application to cross-shore currents. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 100, No. C12, pp. 24.873-24.883.

DHI, 2008. Profile development. LITPROF user guide. Danish Hydraulic Institute.

Freire, P., Oliveira, F.S.B.F., Capitão, R., Fortes, C. and Costa, M., 2004, Cross-shore evolution of Buarcos beach, Portugal. 29th International Conference on Coastal Engineering, ASCE, Lisboa, Portugal, pp. 2314-2326.

Freire, P., Sancho, F. and Oliveira, F.S.B.F., 2008. Composite modelling of sediment dynamics for propagating waves reaching coastal defences. Second International Conference on the Application of Physical Modelling to Port and Coastal Protection (Coastlab08), Bari, Italy, pp. 87-90.

Larangeiro, S.H.C.D., Oliveira, F.S.B.F. and Freire, P.M.S., 2003. Longshore sediment transport along a sandy coast with hard rock outcrops, *Shore and Beach*, Vol.71, No.2, pp. 20-24.

Oliveira, F.S.B.F., 2002. Effect of the sea level variation in the offshore limit of the surf zone of Buarcos, Portugal. *Littoral 2002, The changing coast*. EUROCOAST/EUCC, Porto, Portugal, pp. 363-368.

Oliveira, F.S.B.F., 2001. Transporte Litoral perpendicular à costa. Relatório 1 - Modelação Matemática da Hidrodinâmica e Transporte de Sedimentos na Zona Costeira. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal.

Oliveira, F.S.B.F., 2011. Avaliação do Modelo de Erosão de Praias e Dunas – Xbeach: Resultados Preliminares. 11º Congresso da Água, Porto, Portugal.

Sutherland, J., Peet, A.H., Soulsby, R.L., 2004. Evaluating the performance of morphological models. *Coastal Engineering*, 51, pp. 917-939.

Tucker, M.J., 1954. Surfbeats: sea waves of 1 to 5 minutes' period. *Proc. R. Soc. London, Ser. A* 202, 565-573.

Van Rijn, L.C., Walstra, D.J.R., Grasmeyer, B., Sutherland, J., Pan, S., Sierra, J.P., 2003. The predictability of cross-shore bed evolution of sandy beaches at the time scale of storms and seasons using process-based profile models. *Coastal Engineering*, 47, pp. 295-327.

# **EFEITOS DE ESCALA EM MODELAÇÃO NUMÉRICA DA EROSÃO DE UM PERFIL DE PRAIA**

**Anexo A: Modelo reduzido**



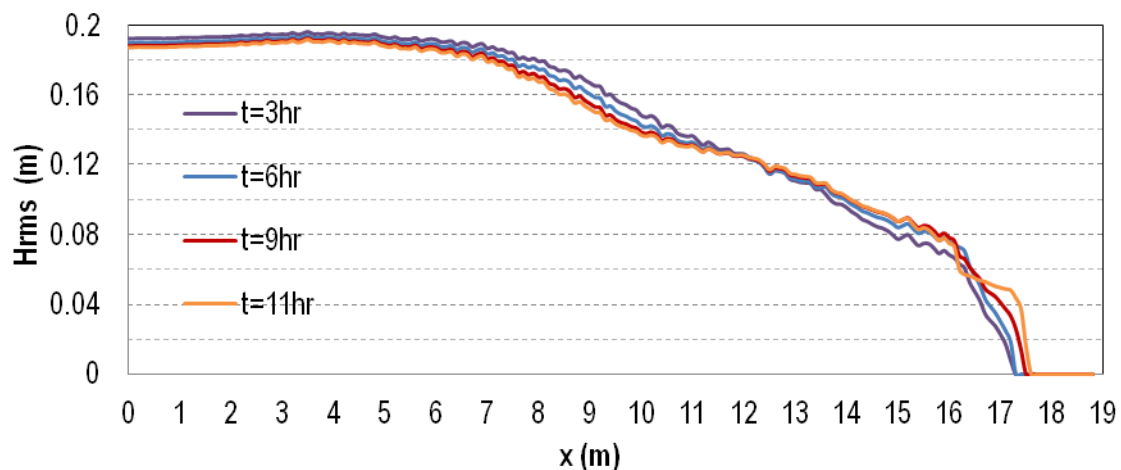


Figura 24 – Resultados da evolução da variável Hrms ao longo de 11 horas de simulação numérica, para o caso default.

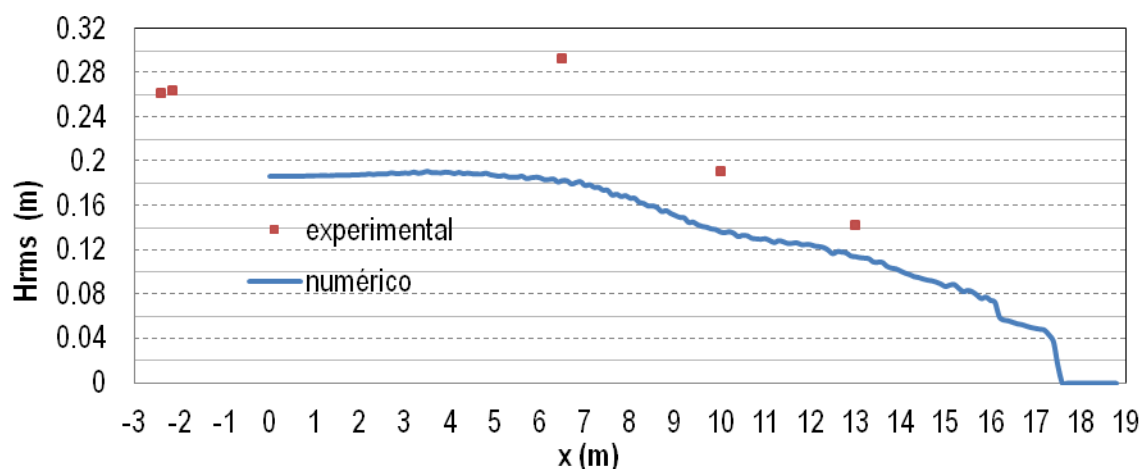


Figura 25 – Comparação dos resultados experimentais e numéricos da variável Hrms, para o caso default.

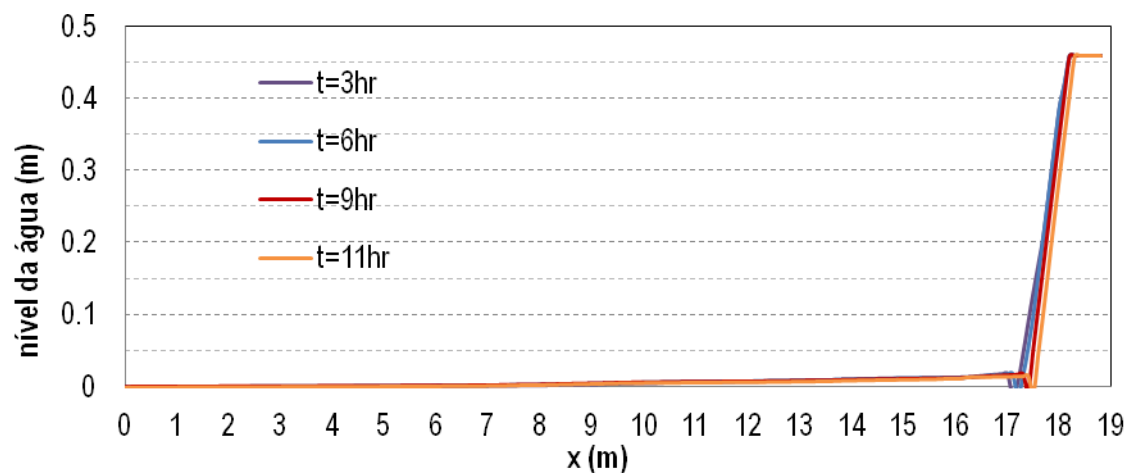


Figura 26 - Resultados da evolução do nível da água ao longo de 11 horas de simulação numérica, para o caso default.

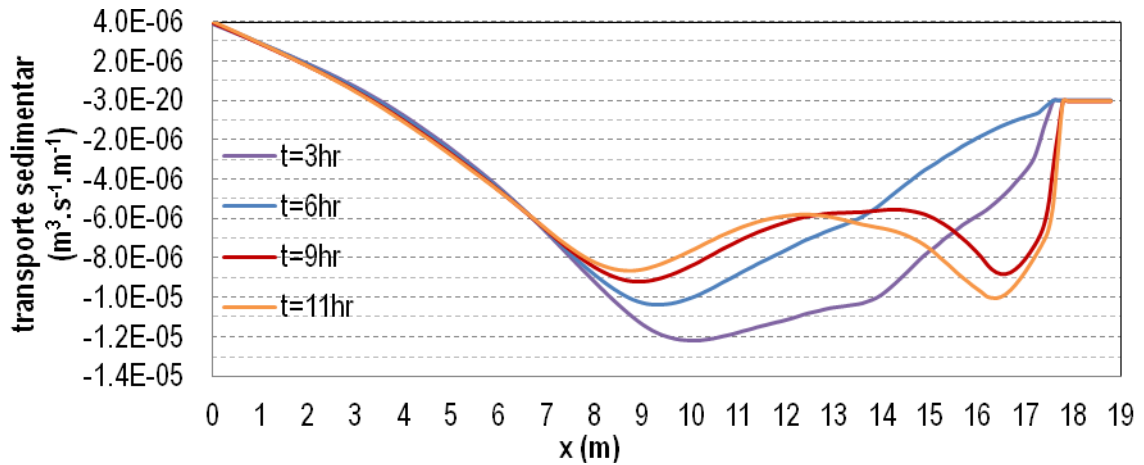


Figura 27 – Resultados da evolução do transporte sedimentar ao longo de 11 horas de simulação numérica, para o caso default.

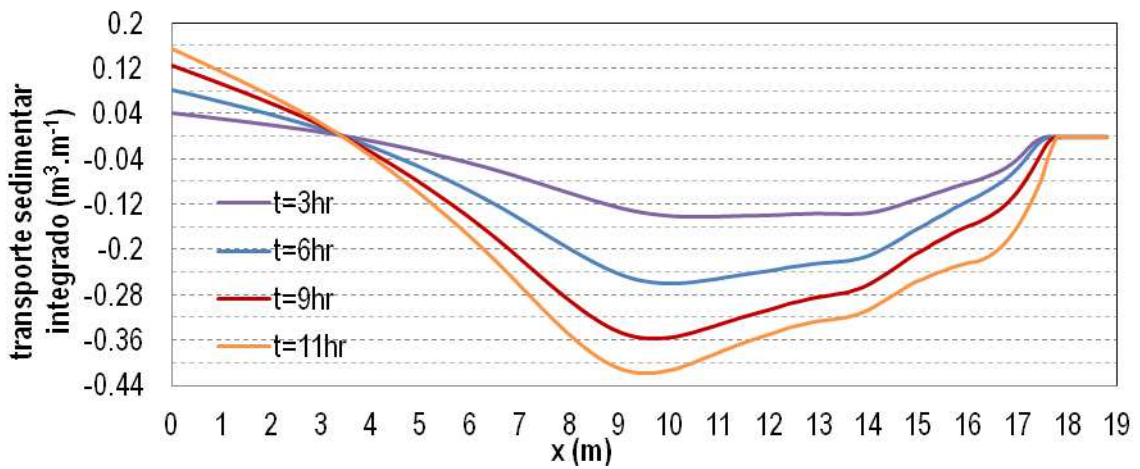


Figura 28 – Resultados da evolução do transporte sedimentar integrado ao longo de 11 horas de simulação numérica, para o caso default.

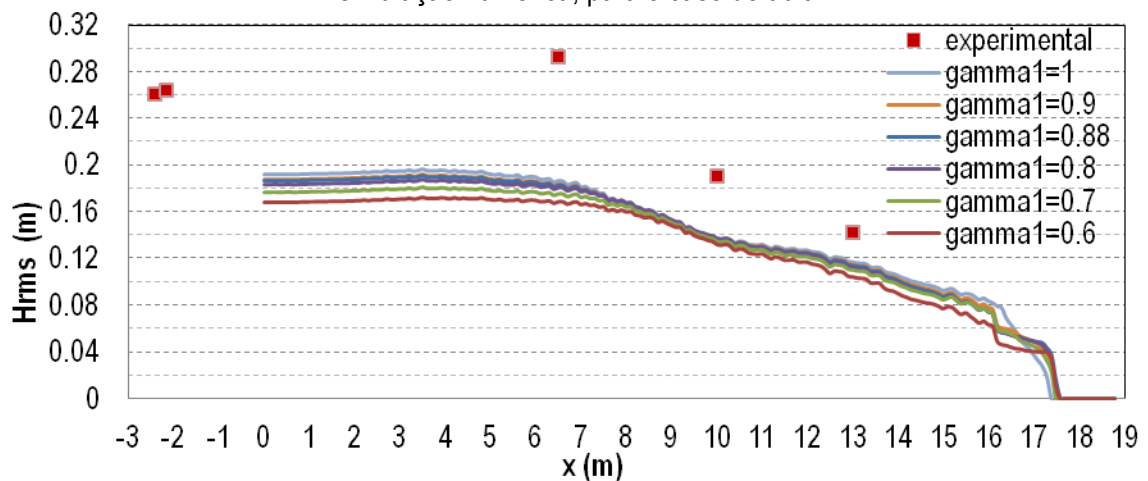


Figura 29 – Resultados da evolução da variável  $H_{rms}$  ao fim de 11 horas. Teste ao parâmetro  $\gamma_1$ .

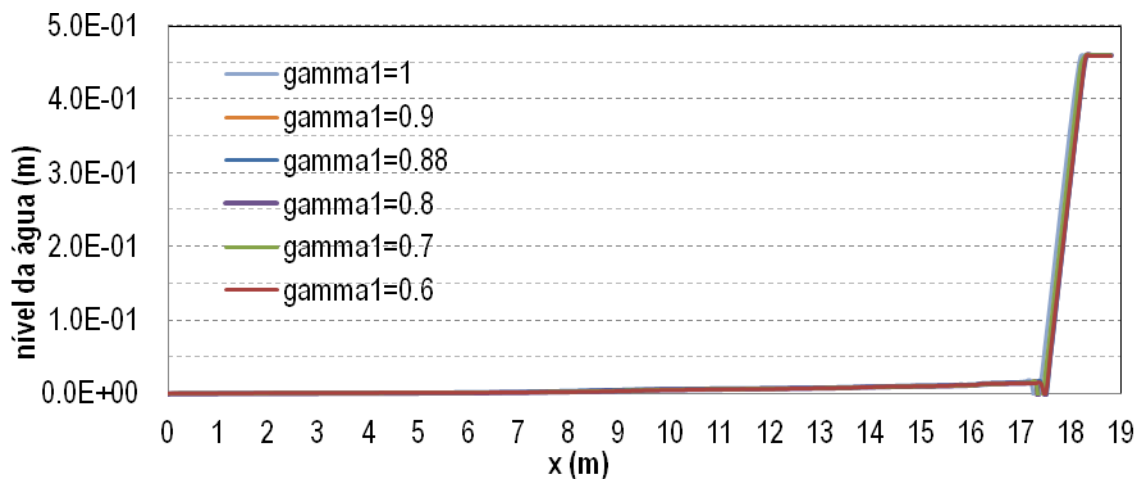


Figura 30 - Resultados da evolução do nível da água ao fim de 11 horas. Teste ao parâmetro gamma1.

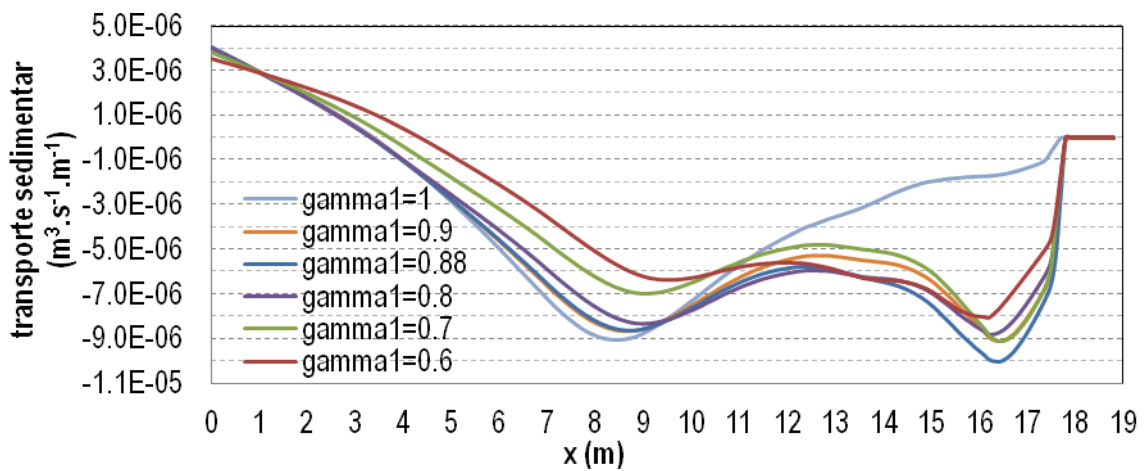


Figura 31 - Resultados da evolução do transporte sedimentar ao fim de 11 horas. Teste ao parâmetro gamma1.

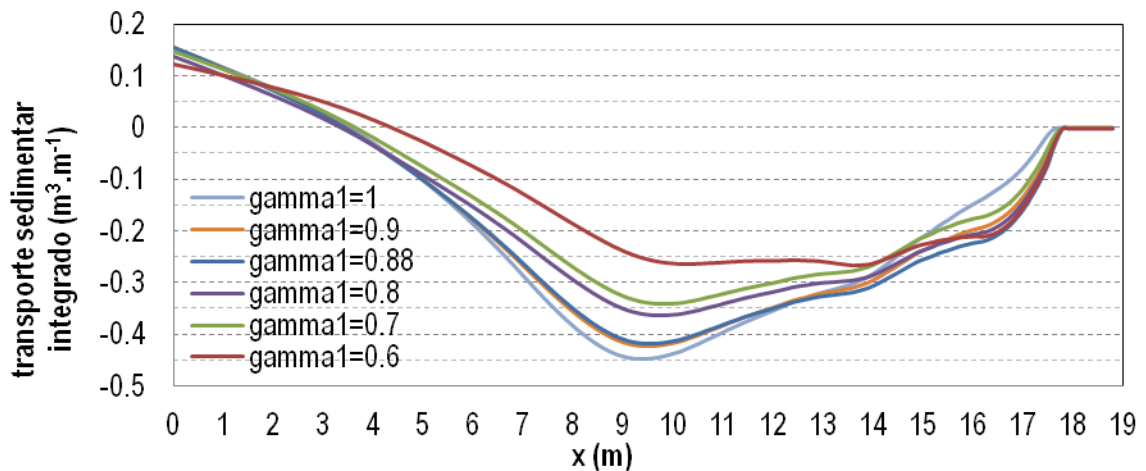


Figura 32 - Resultados da evolução do transporte sedimentar integrado ao fim de 11 horas. Teste ao parâmetro gamma1.

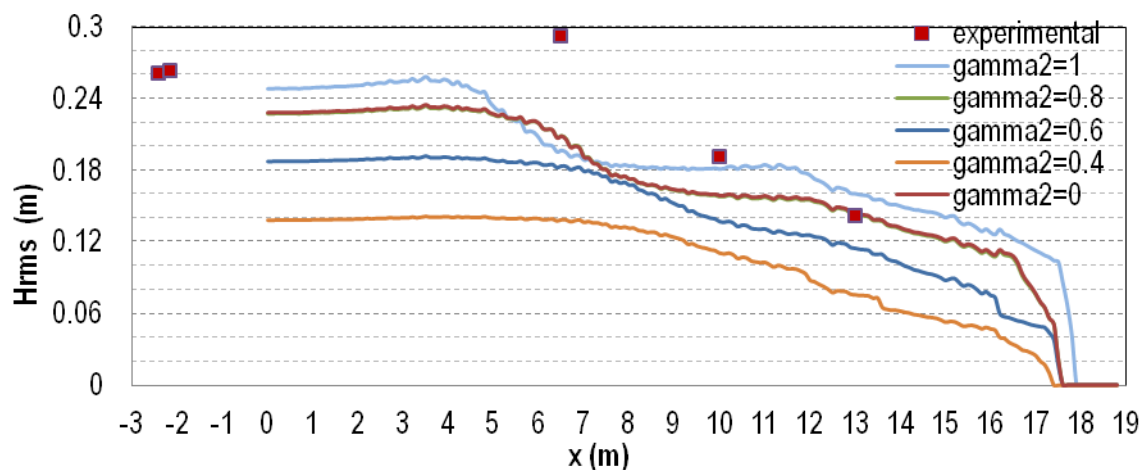


Figura 33 - Resultados da evolução da variável Hrms ao fim de 11 horas. Teste ao parâmetro gamma2.

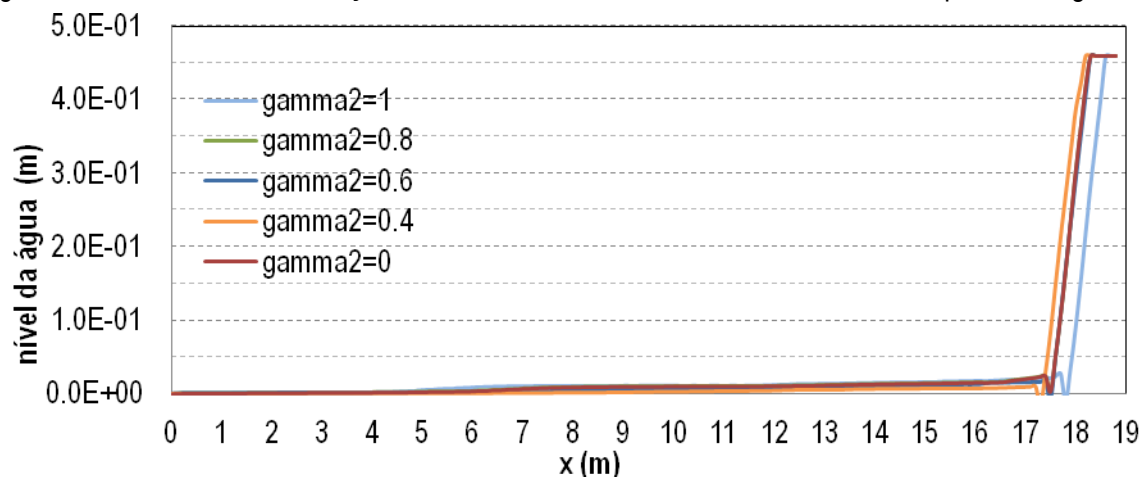


Figura 34 - Resultados da evolução do nível da água ao fim de 11 horas. Teste ao parâmetro gamma2.

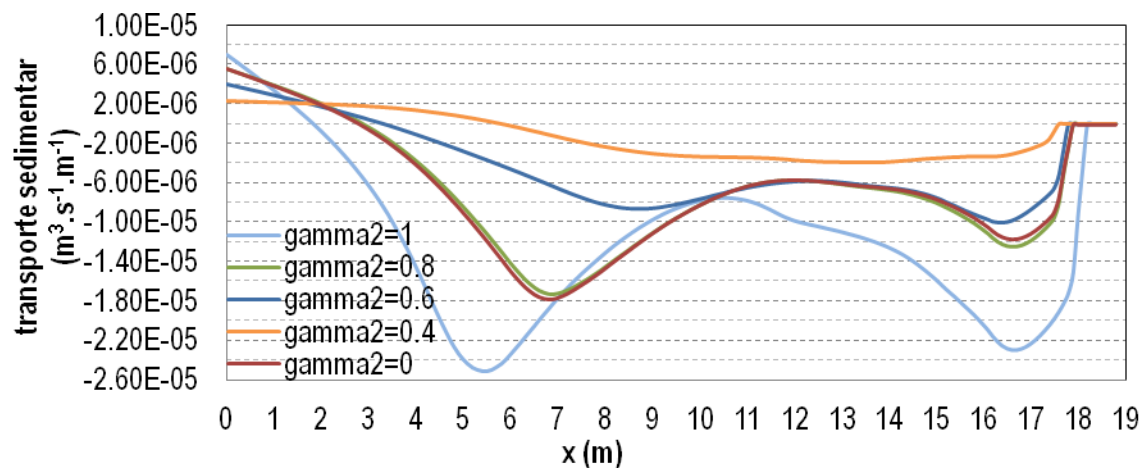


Figura 35 - Resultados da evolução do transporte sedimentar ao fim de 11 horas. Teste ao parâmetro gamma2.

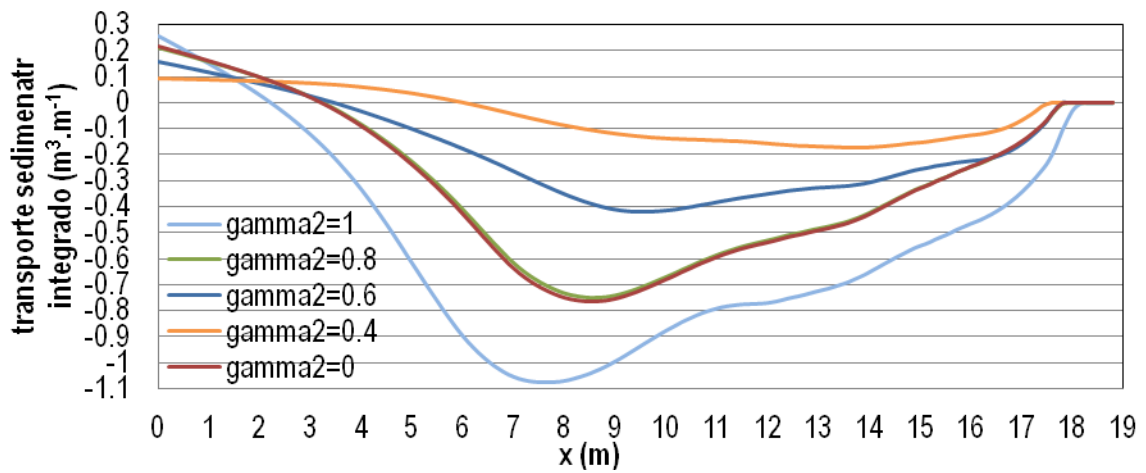


Figura 36 - Resultados da evolução do transporte sedimentar integrado ao fim de 11 horas. Teste ao parâmetro  $\gamma_2$ .

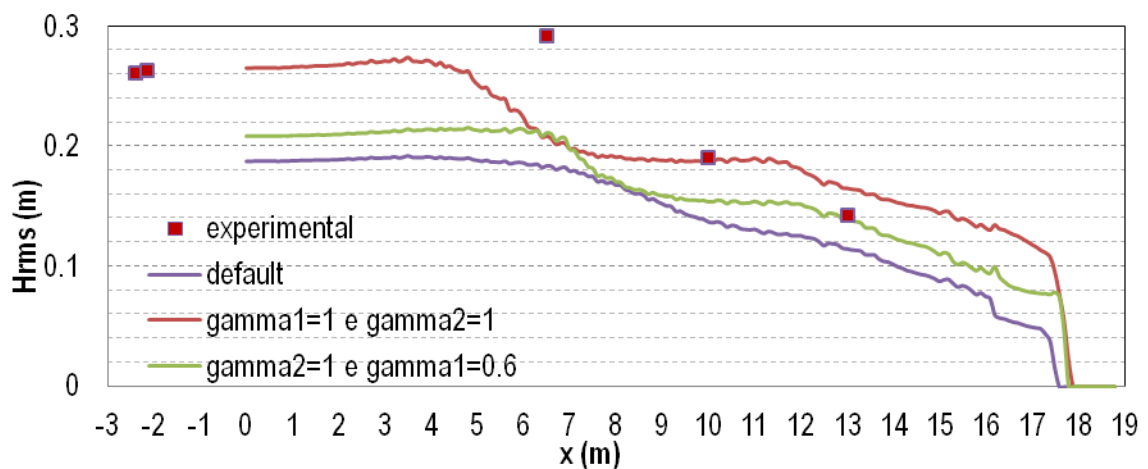


Figura 37 - Resultados da evolução da variável Hrms ao fim de 11 horas. Teste aos parâmetros  $\gamma_1$  e  $\gamma_2$ .

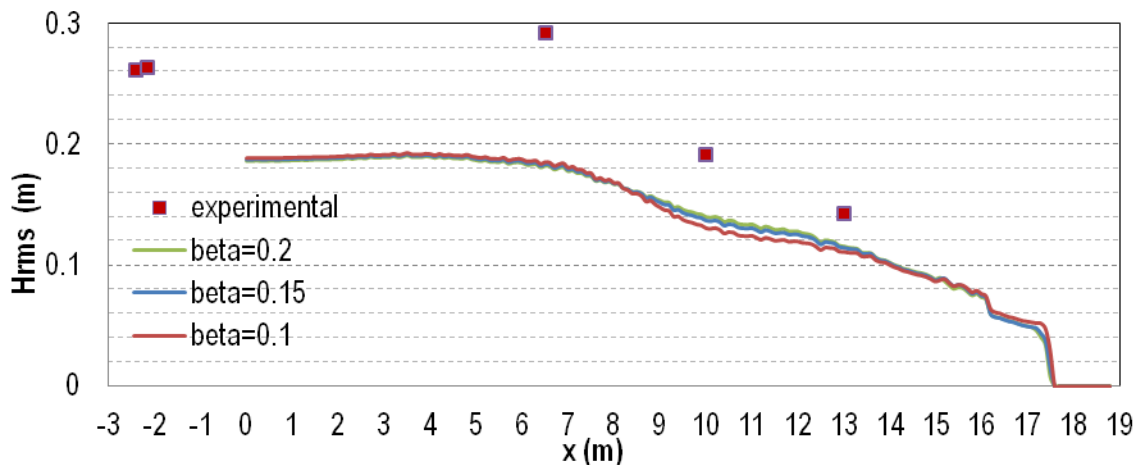


Figura 38 - Resultados da evolução da variável Hrms ao fim de 11 horas. Teste ao parâmetro  $\beta$ .



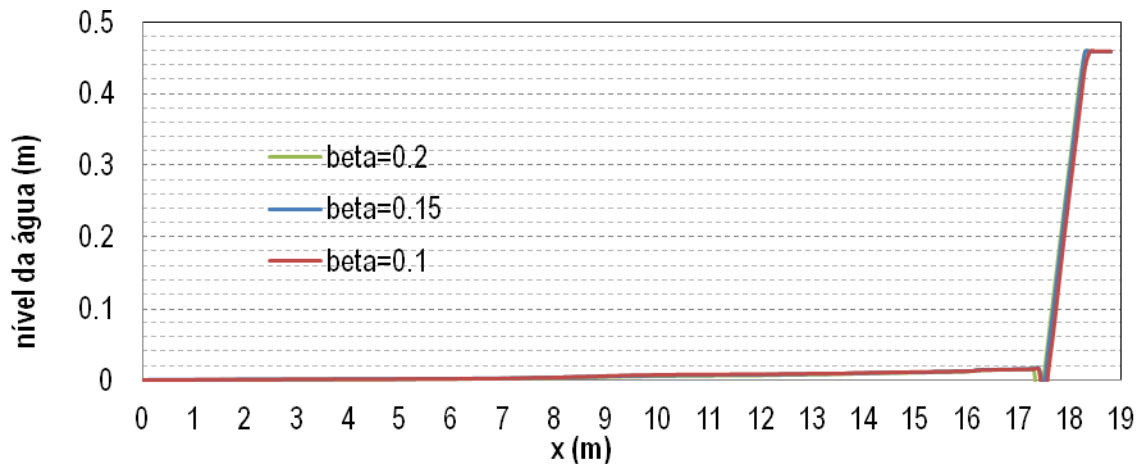


Figura 39 - Resultados da evolução do nível da água ao fim de 11 horas. Teste ao parâmetro beta.

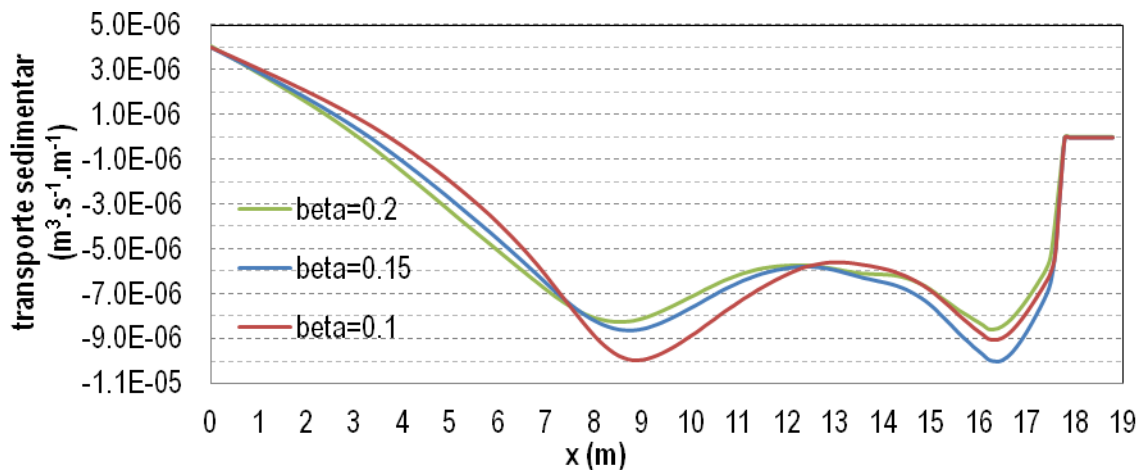


Figura 40 - Resultados da evolução do transporte sedimentar ao fim de 11 horas. Teste ao parâmetro beta.

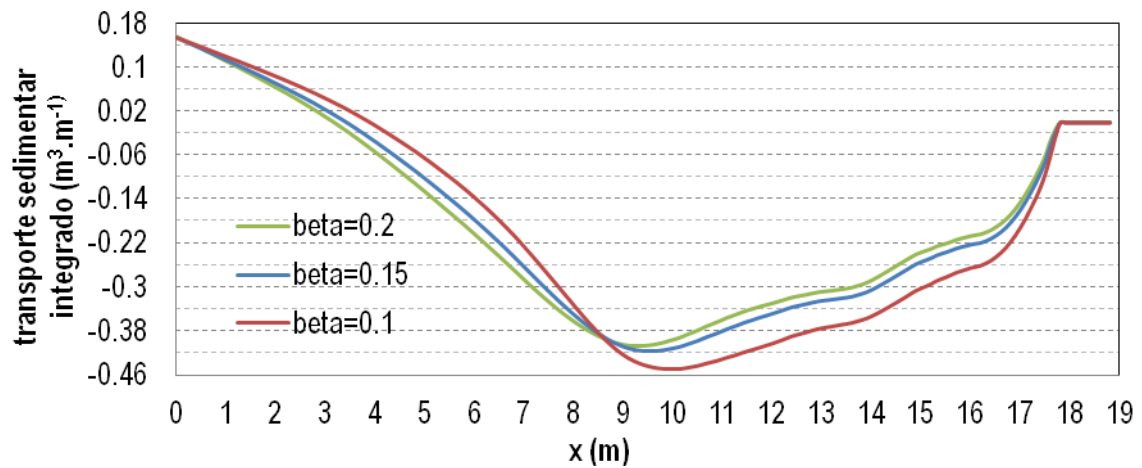


Figura 41 - Resultados da evolução do transporte sedimentar integrado ao fim de 11 horas. Teste ao parâmetro beta.

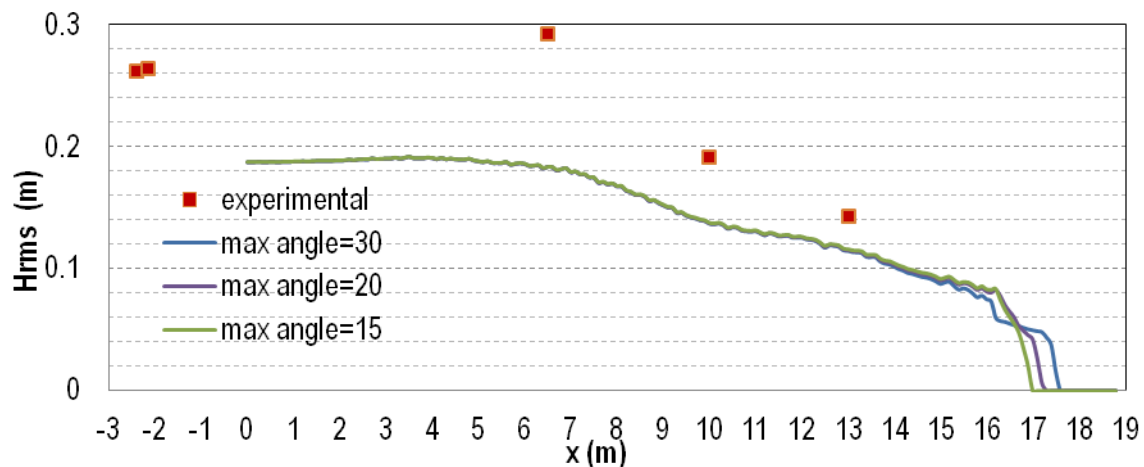


Figura 42 - Resultados da evolução da variável Hrms ao fim de 11 horas. Teste ao parâmetro max angle.

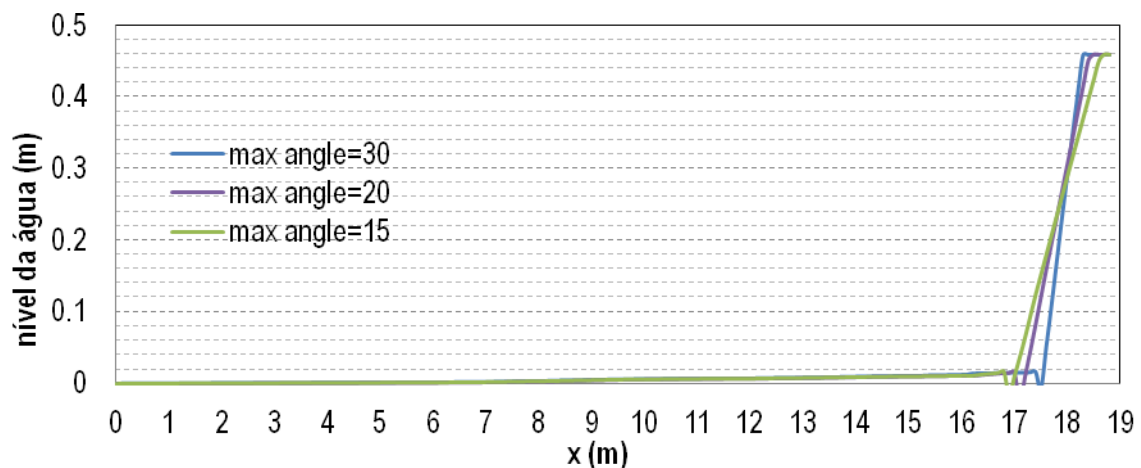


Figura 43 - Resultados da evolução do nível da água ao fim de 11 horas. Teste ao parâmetro max angle.

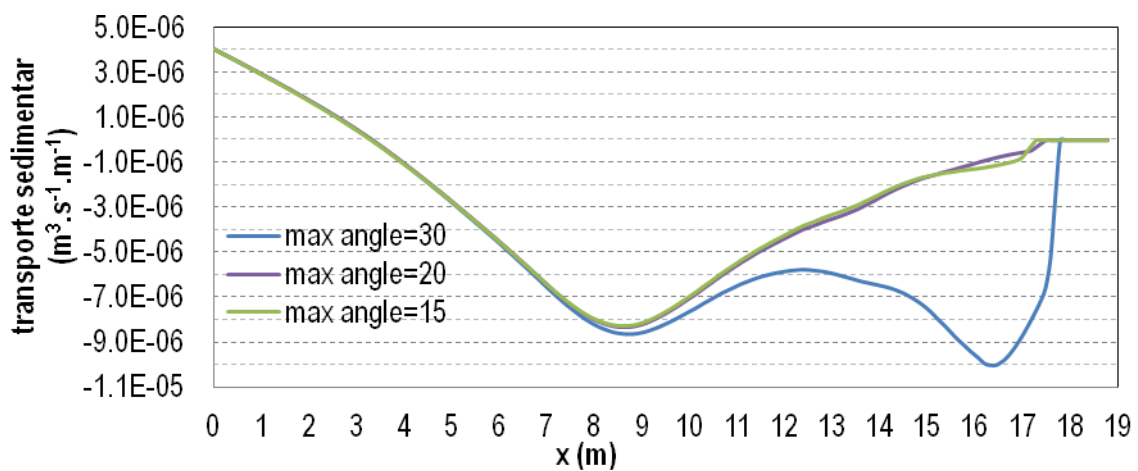


Figura 44 - Resultados da evolução do transporte sedimentar ao fim de 11 horas. Teste ao parâmetro max angle.

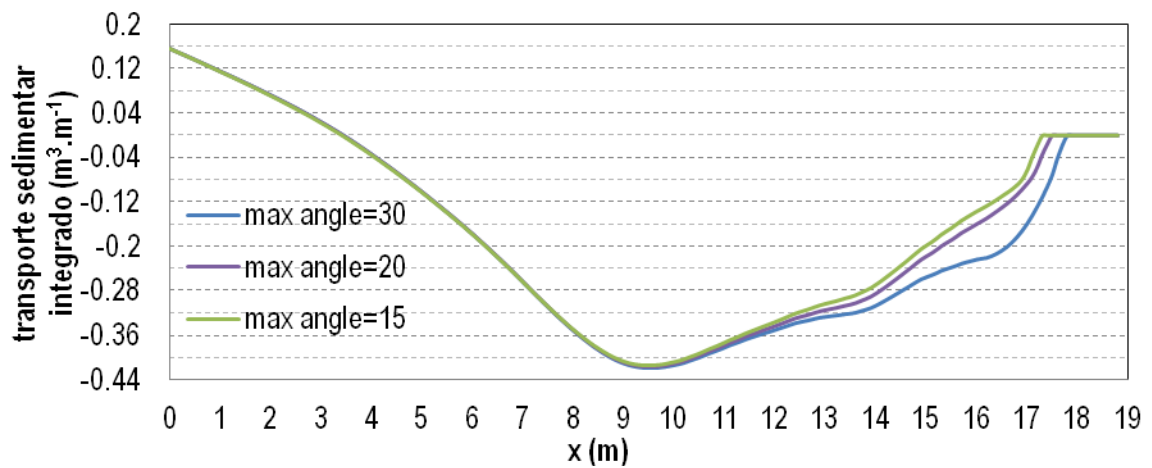


Figura 45 - Resultados da evolução do transporte sedimentar integrado ao fim de 11 horas. Teste ao parâmetro max angle.

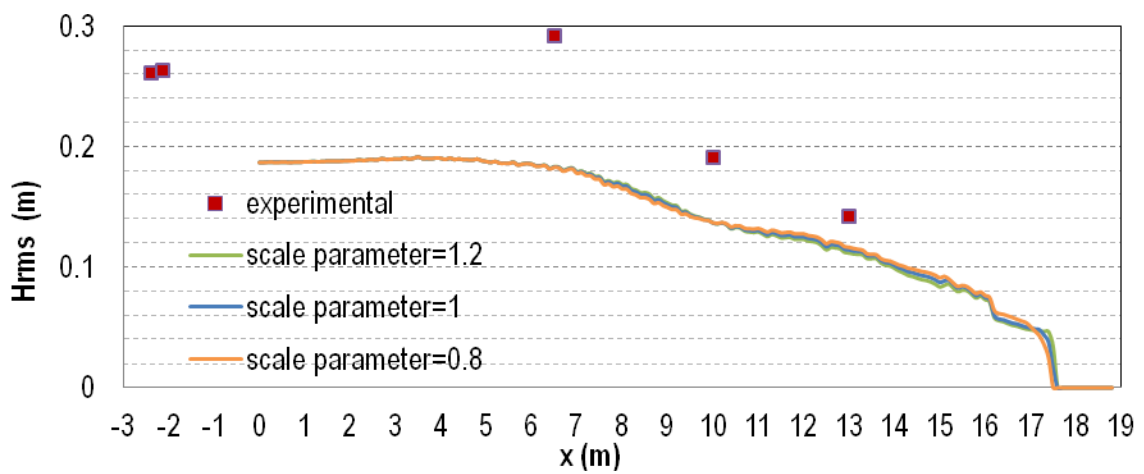


Figura 46 - Resultados da evolução da variável Hrms ao fim de 11 horas. Teste ao parâmetro scale parameter.

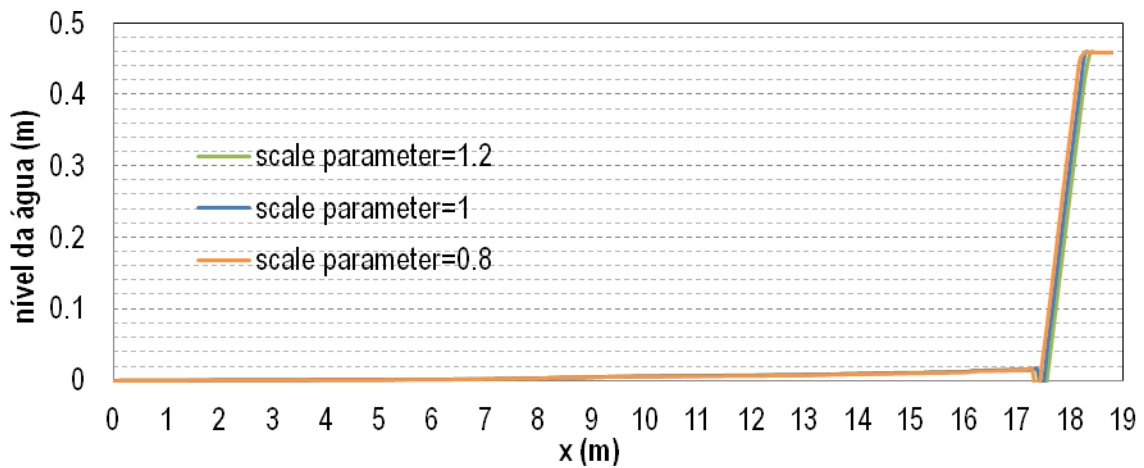


Figura 47 - Resultados da evolução do nível da água ao fim de 11 horas. Teste ao parâmetro scale parameter.

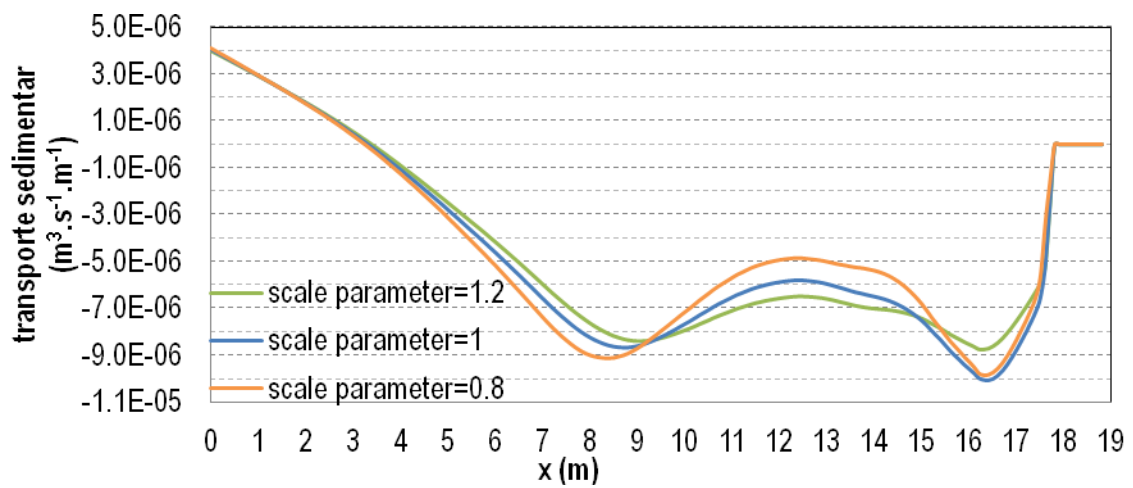


Figura 48 - Resultados da evolução do transporte sedimentar ao fim de 11 horas. Teste ao parâmetro scale parameter.

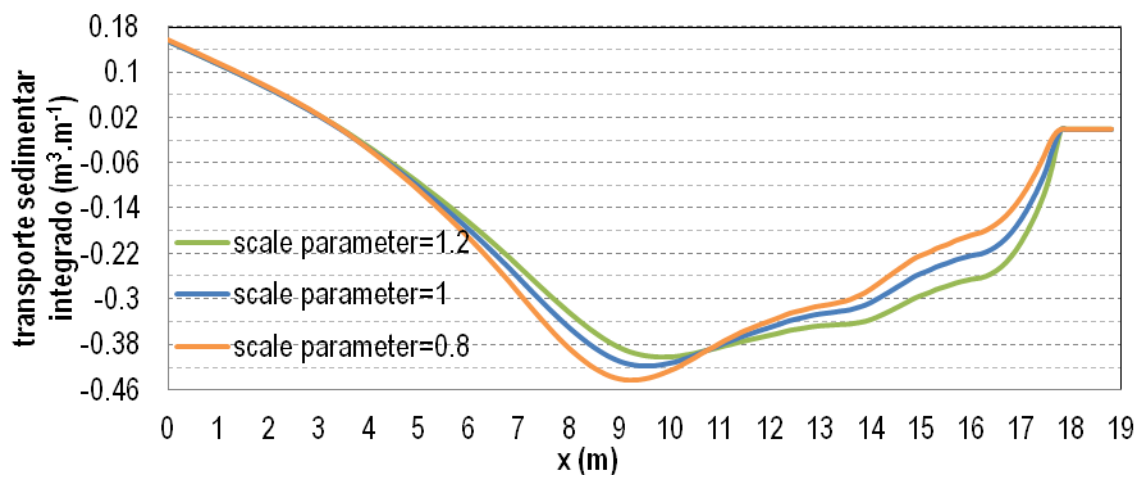


Figura 49 - Resultados da evolução do transporte sedimentar integrado ao fim de 11 horas. Teste ao parâmetro scale parameter.



# **EFEITOS DE ESCALA EM MODELAÇÃO NUMÉRICA DA EROSÃO DE UM PERFIL DE PRAIA**

**Anexo B: Protótipo**



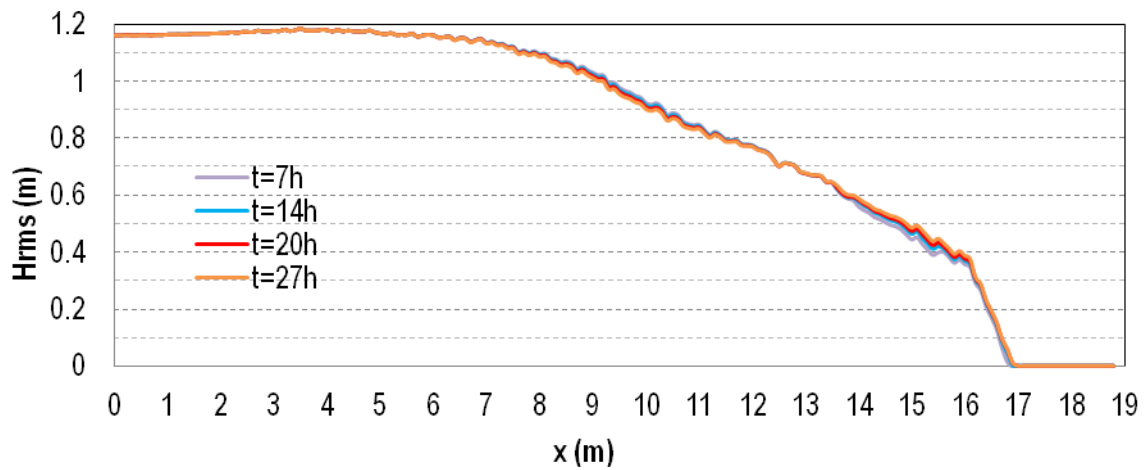


Figura 50 – Resultados da evolução da variável Hrms ao fim de 27 horas, para o caso default.

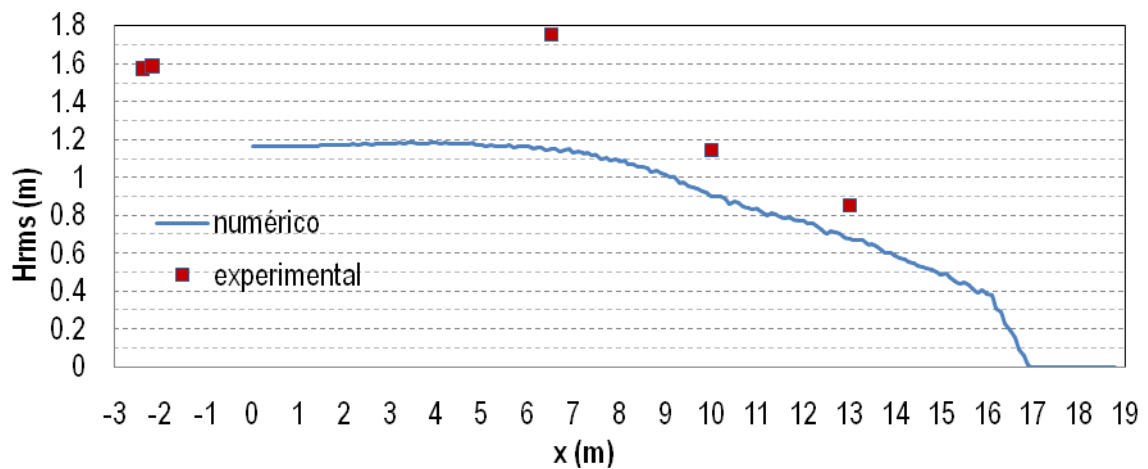


Figura 51 – Comparação dos resultados experimentais e numéricos da variável Hrms, para o caso default.

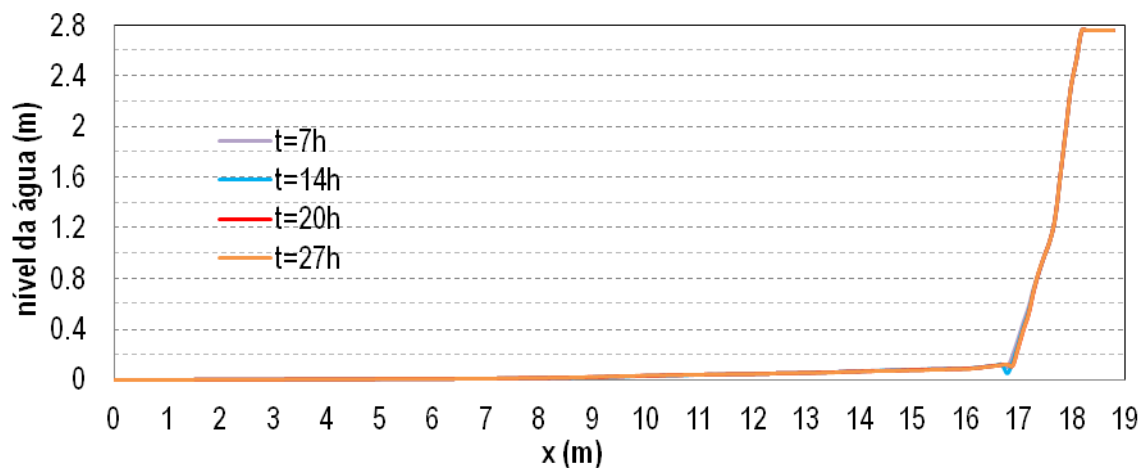


Figura 52 - Resultados da evolução do nível da água ao fim de 27 horas, para o caso default.



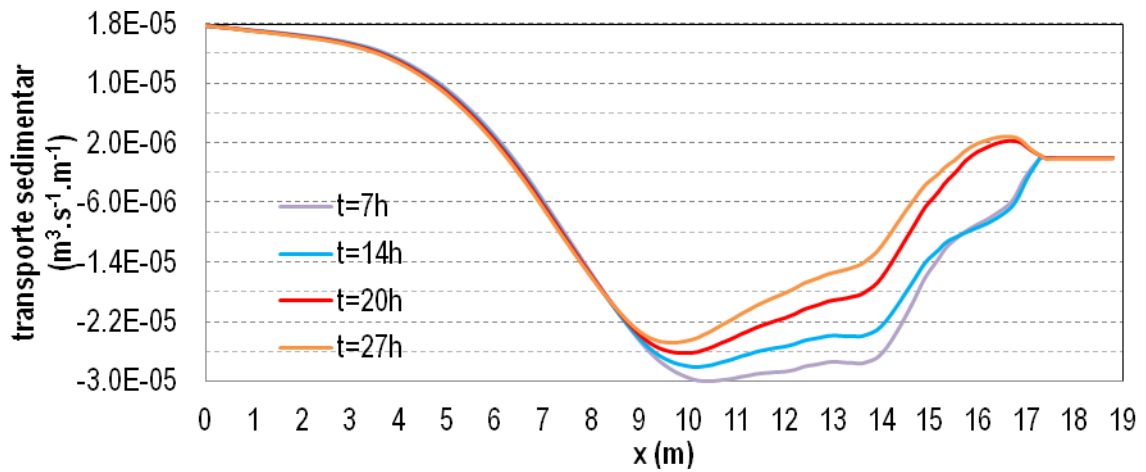


Figura 53 - Resultados da evolução do transporte sedimentar ao fim de 27 horas, para o caso default.

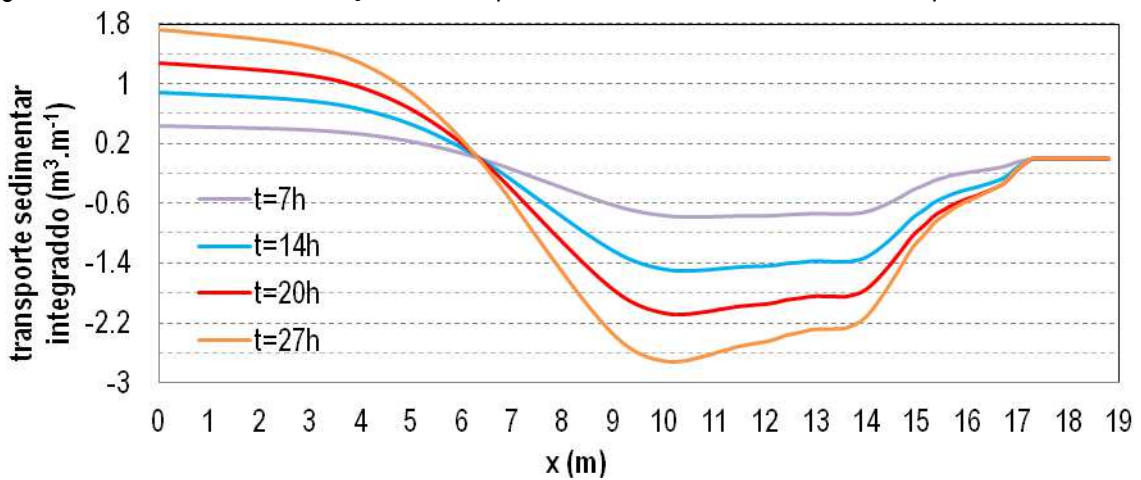


Figura 54 - Resultados da evolução do transporte sedimentar integrado ao fim de 27 horas, para o caso default.

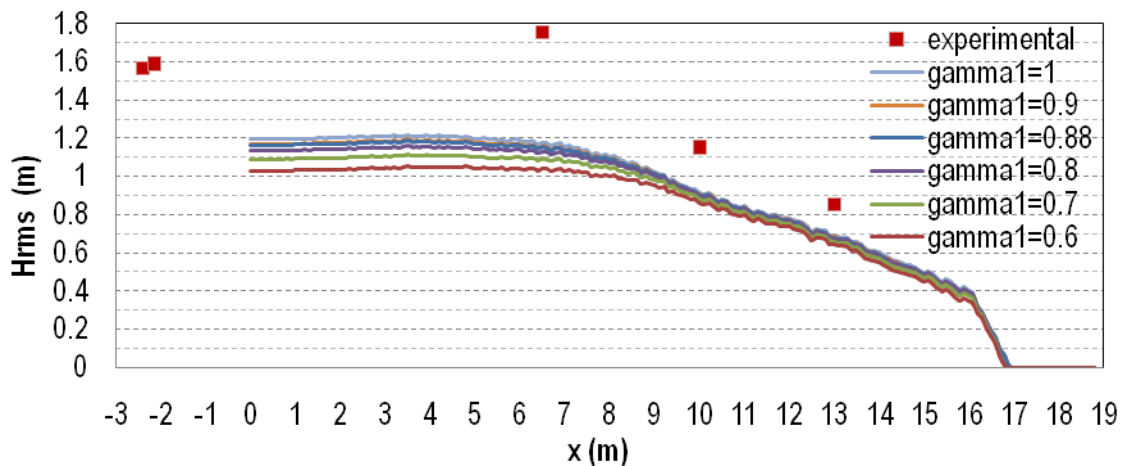


Figura 55 - Resultados da evolução da variável Hrms ao fim de 27 horas. Teste ao parâmetro gamma1.

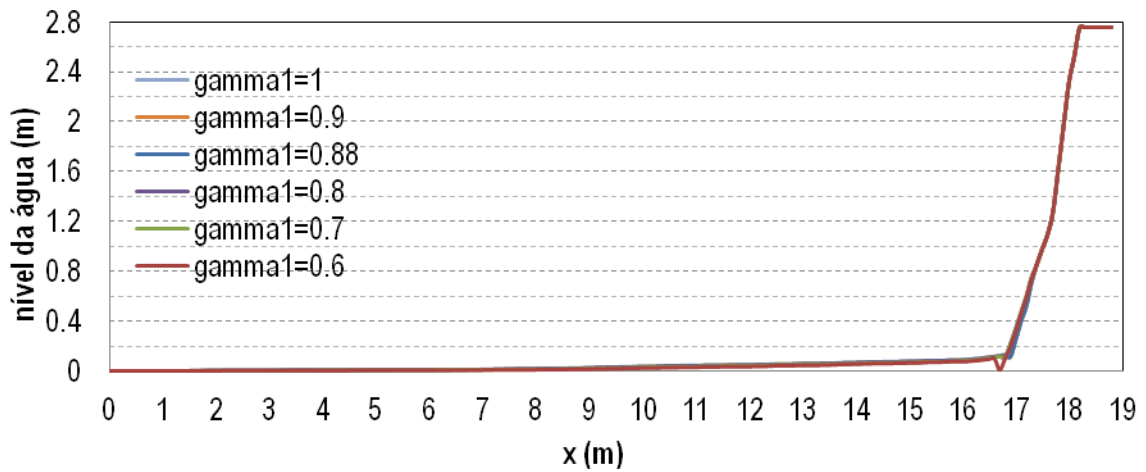


Figura 56 - Resultados da evolução do nível da água ao fim de 27 horas. Teste ao parâmetro gamma1.

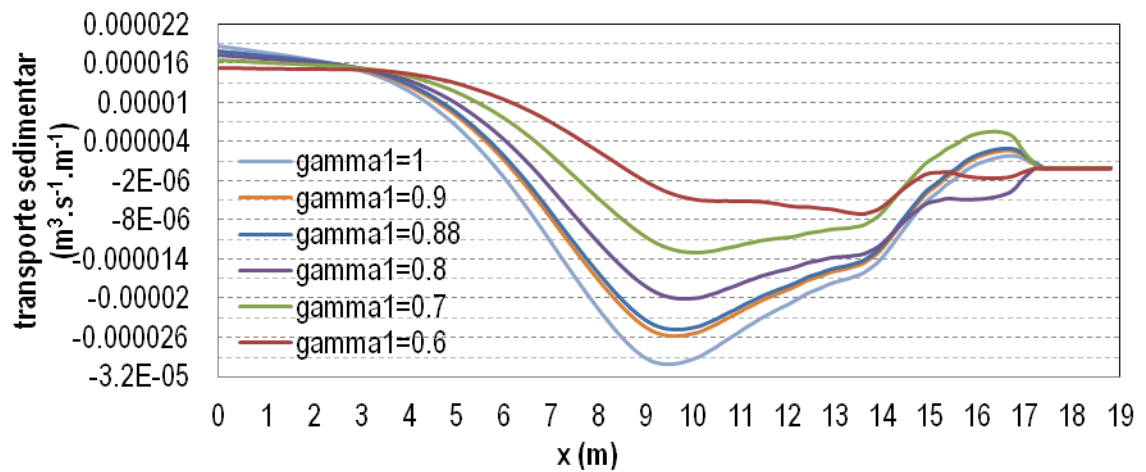


Figura 57 - Resultados da evolução do transporte sedimentar ao fim de 27 horas. Teste ao parâmetro gamma1.

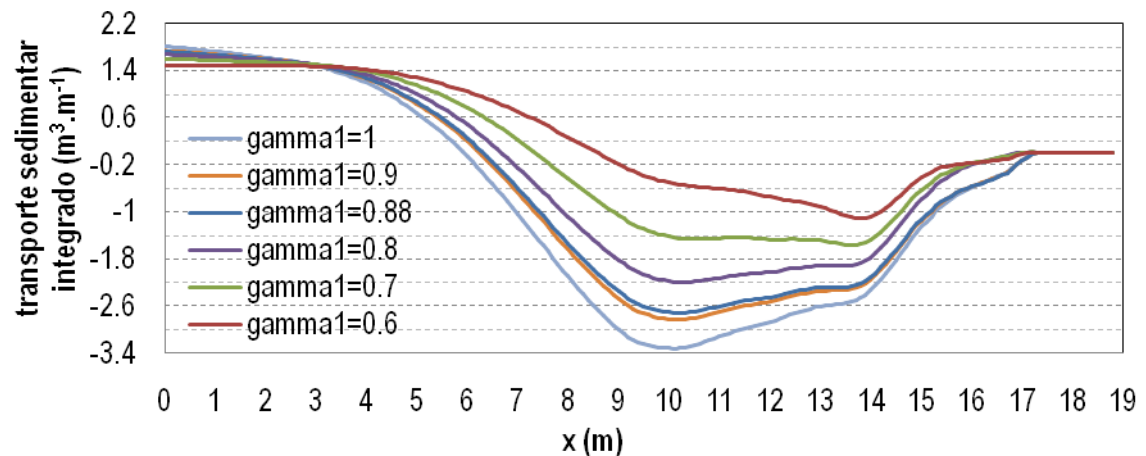


Figura 58 - Resultados da evolução do transporte sedimentar integrado ao fim de 27 horas. Teste ao parâmetro gamma1.

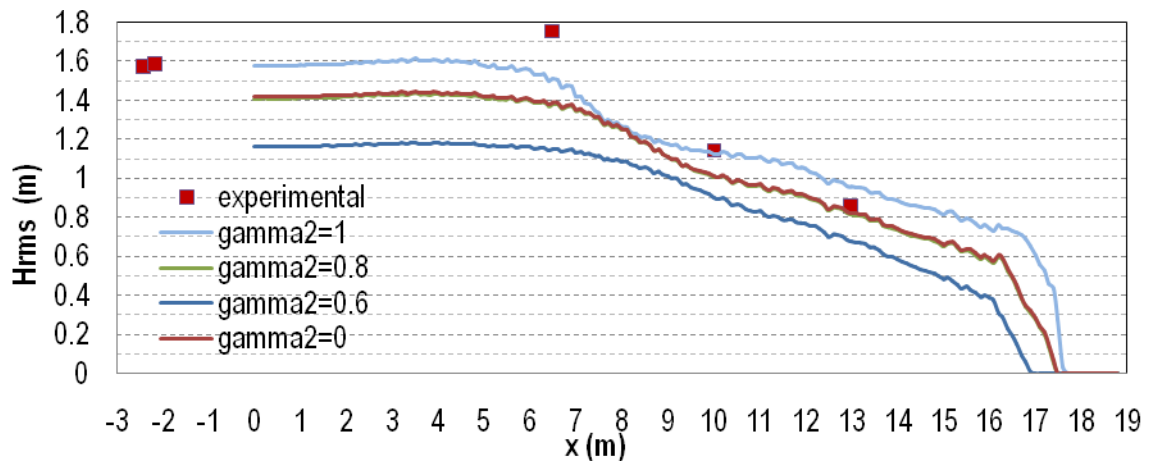


Figura 59 - Resultados da evolução da variável Hrms ao fim de 27 horas. Teste ao parâmetro gamma2.

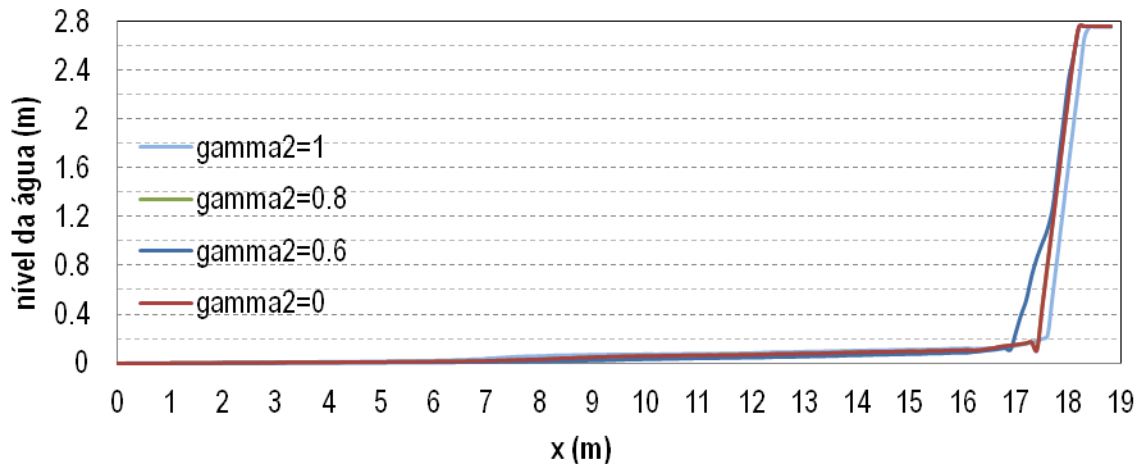


Figura 60 - Resultados da evolução do nível da água ao fim de 27 horas. Teste ao parâmetro gamma2.

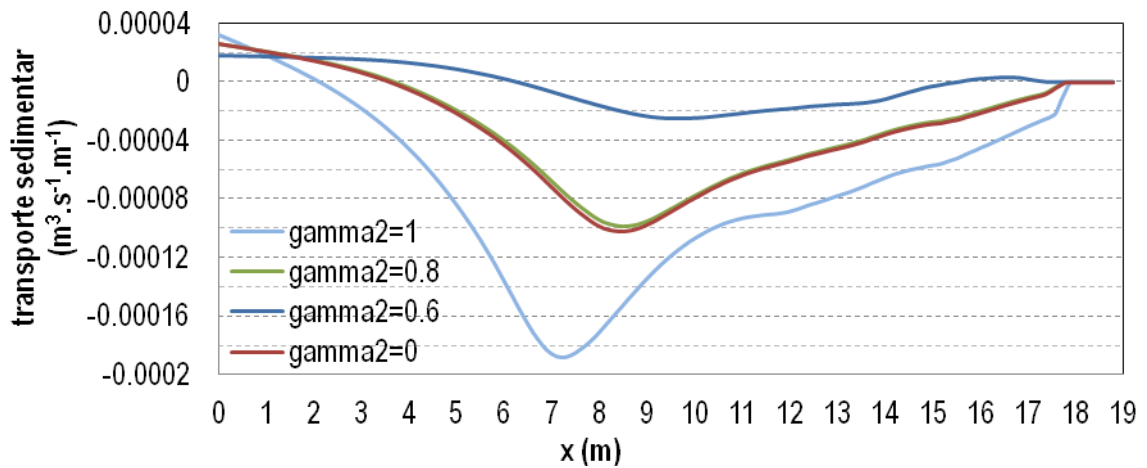


Figura 61 - Resultados da evolução do transporte sedimentar ao fim de 27 horas. Teste ao parâmetro gamma2.

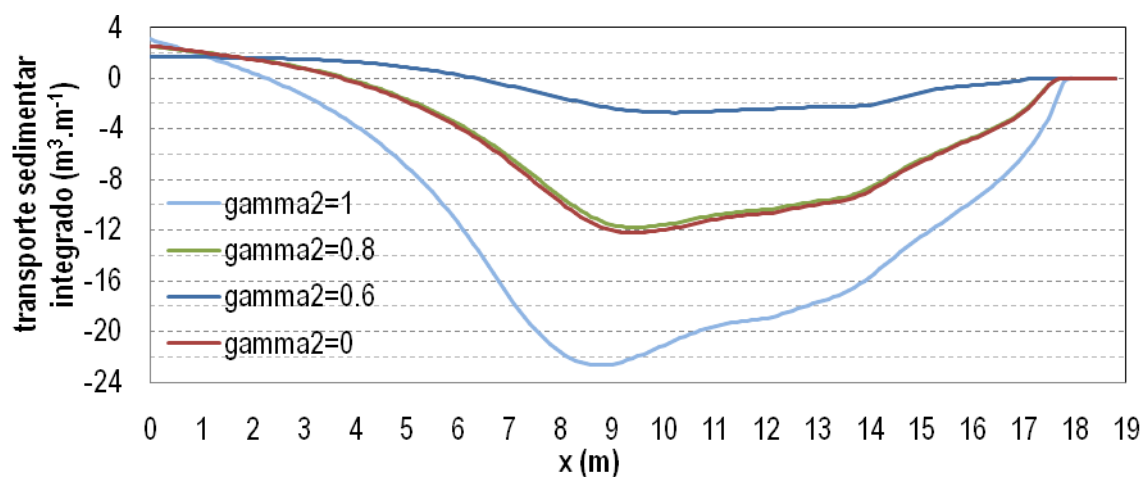


Figura 62 - Resultados da evolução do transporte sedimentar integrado ao fim de 27 horas. Teste ao parâmetro gamma2.

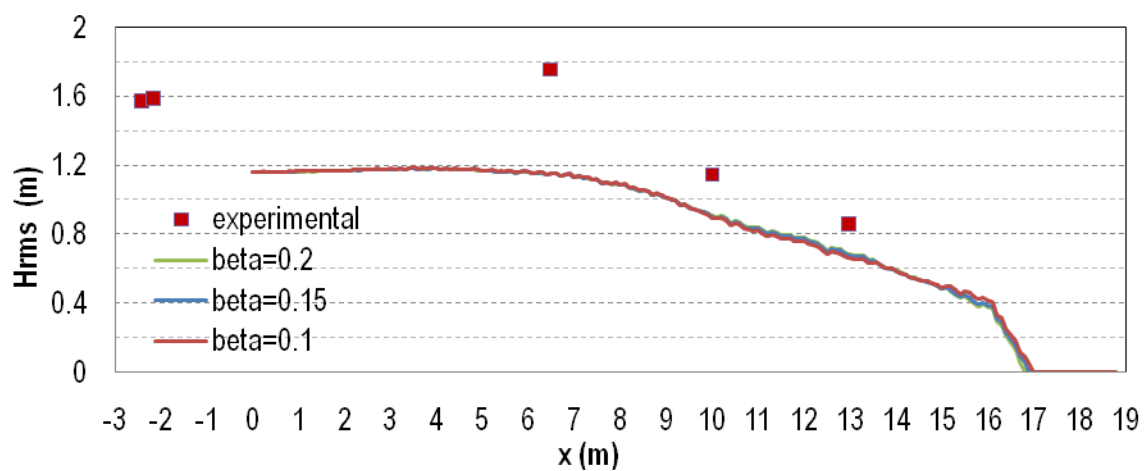


Figura 63 - Resultados da evolução da variável Hrms ao fim de 27 horas. Teste ao parâmetro beta.

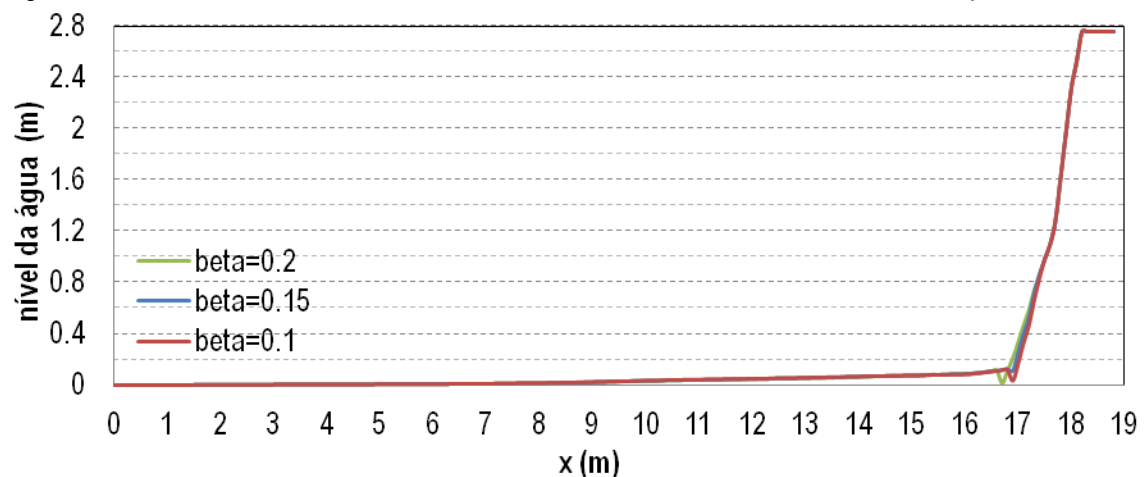


Figura 64 - Resultados da evolução do nível da água ao fim de 27 horas. Teste ao parâmetro beta.

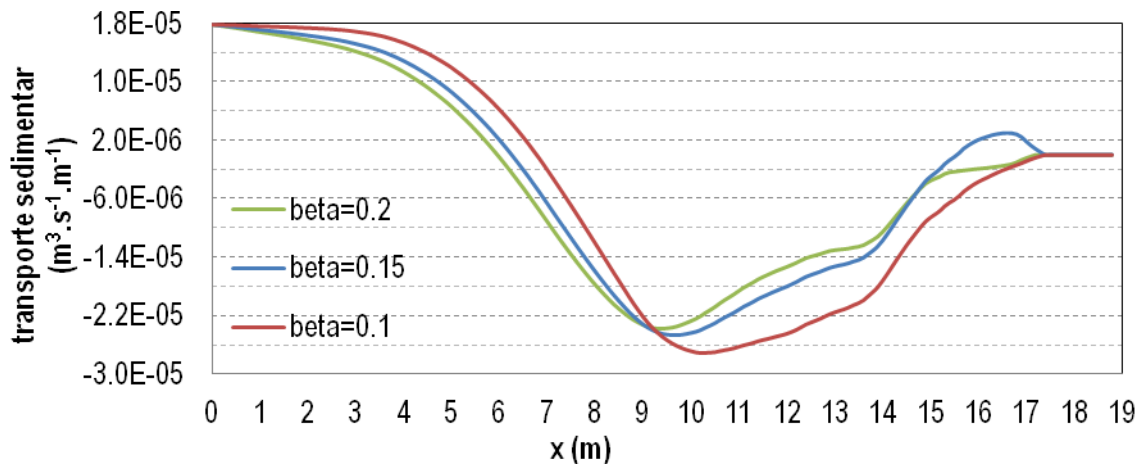


Figura 65 - Resultados da evolução do transporte sedimentar ao fim de 27 horas. Teste ao parâmetro beta.

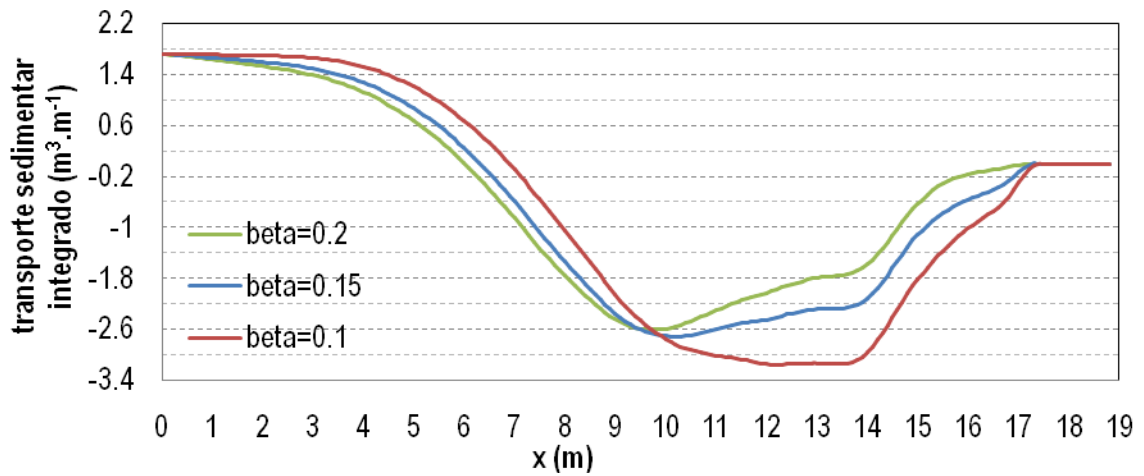


Figura 66 - Resultados da evolução do transporte sedimentar integrado ao fim de 27 horas. Teste ao parâmetro beta.

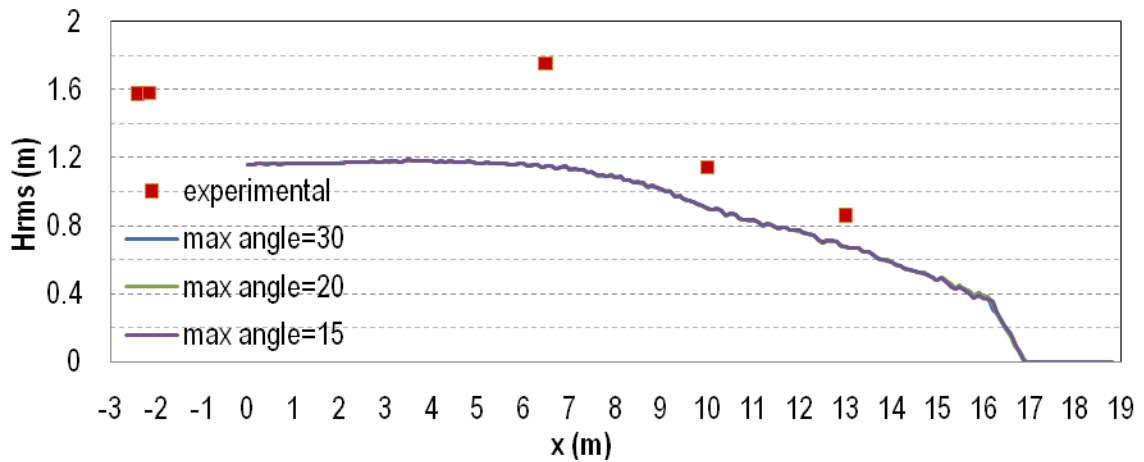


Figura 67 - Resultados da evolução da variável  $H_{rms}$  ao fim de 27 horas. Teste ao parâmetro max angle.

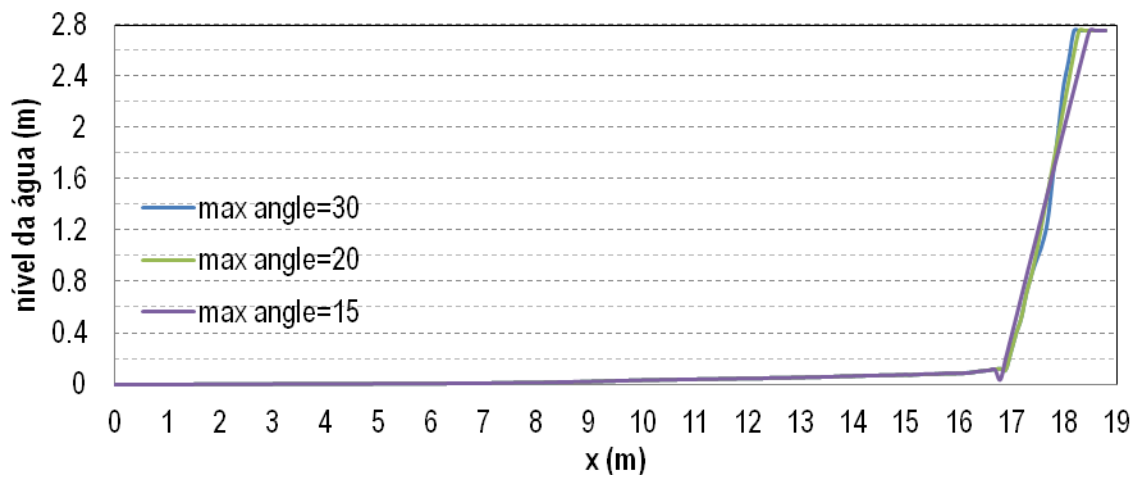


Figura 68 - Resultados da evolução do nível da água ao fim de 27 horas. Teste ao parâmetro max angle.

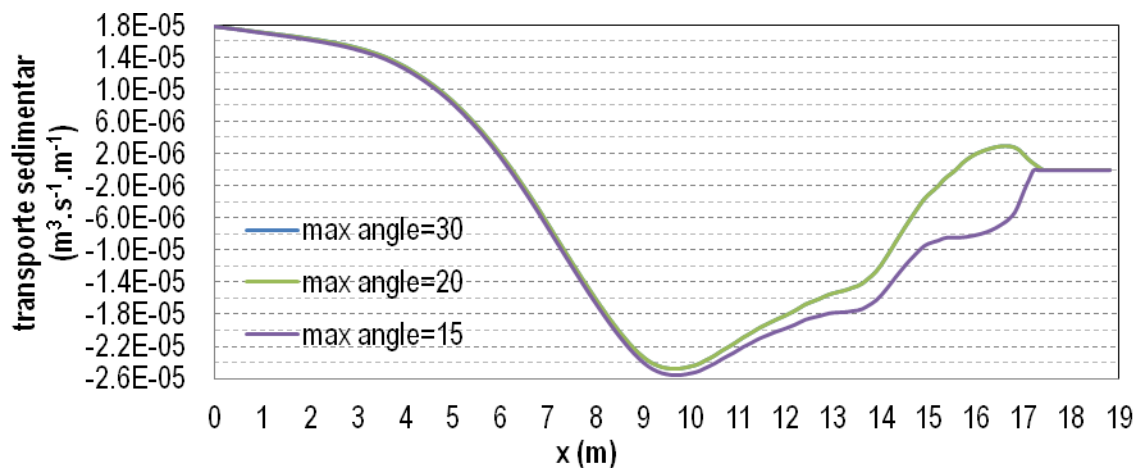


Figura 69 - Resultados da evolução do transporte sedimentar ao fim de 27 horas. Teste ao parâmetro max angle.

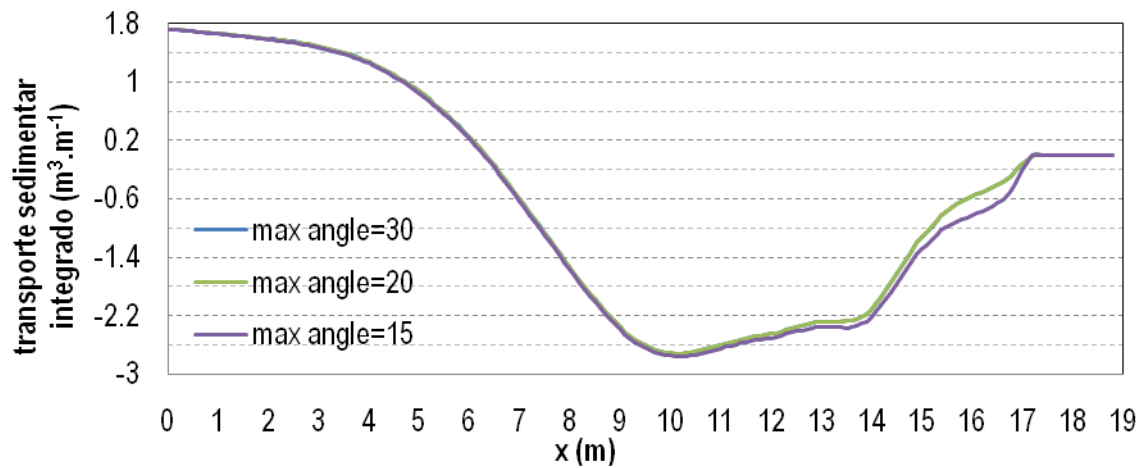


Figura 70 - Resultados da evolução do transporte sedimentar integrado ao fim de 27 horas. Teste ao parâmetro max angle.

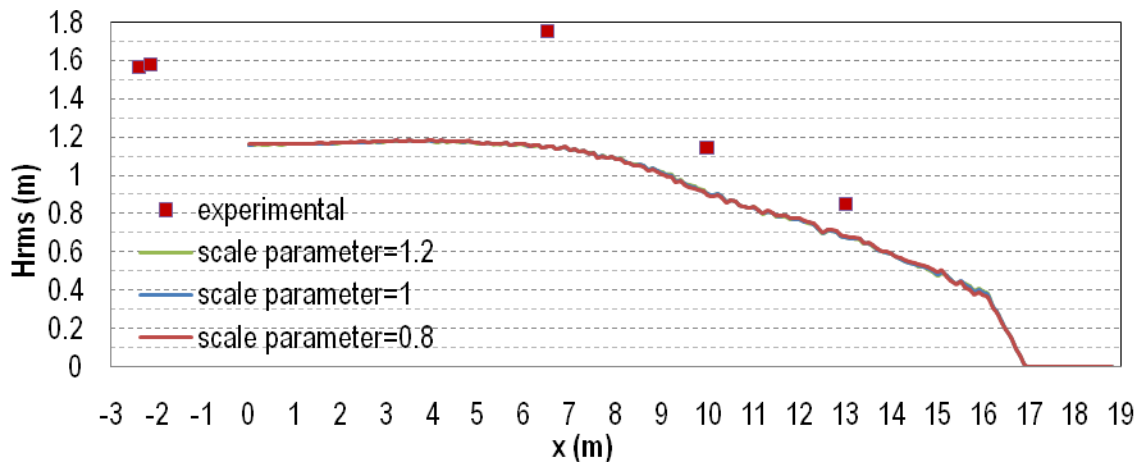


Figura 71 - Resultados da evolução da variável Hrms ao fim de 27 horas. Teste ao parâmetro scale parameter.

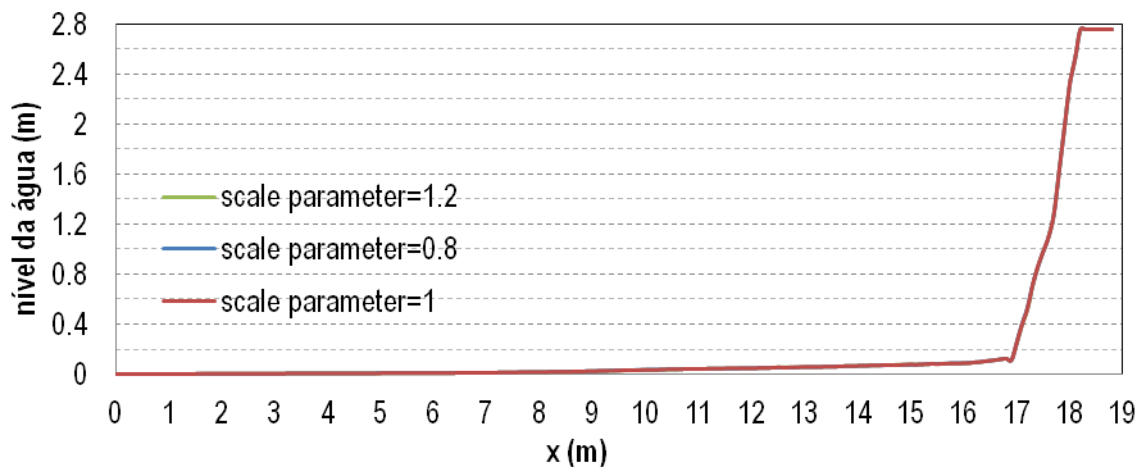


Figura 72 - Resultados da evolução do nível da água ao fim de 27 horas. Teste ao parâmetro scale parameter.

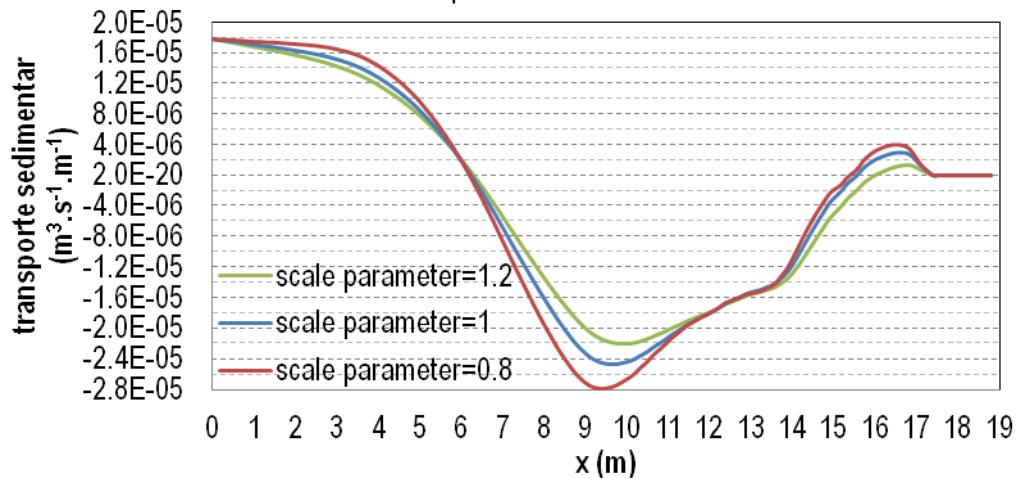


Figura 73 - Resultados da evolução do transporte sedimentar ao fim de 27 horas. Teste ao parâmetro scale parameter.

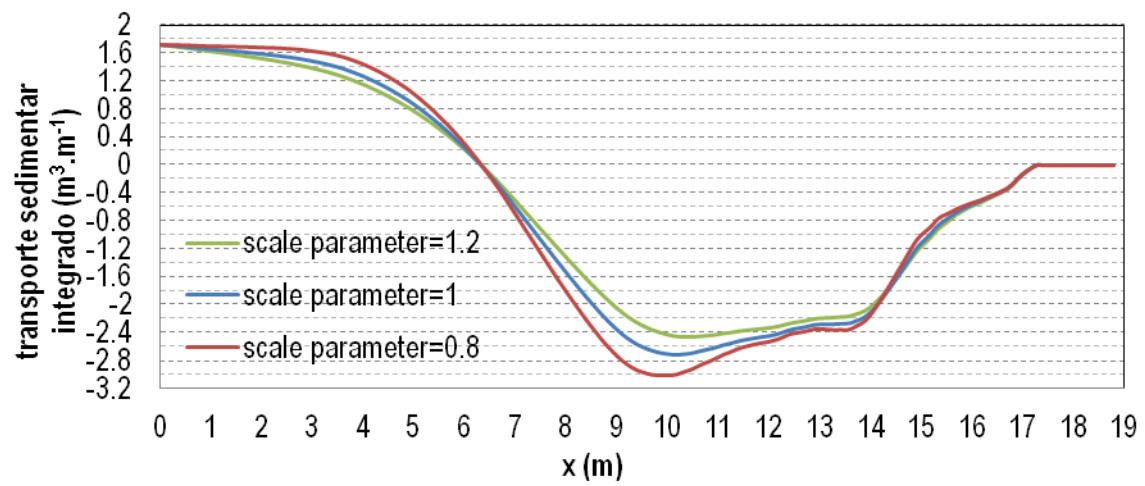


Figura 74 – Resultados da evolução do transporte sedimentar integrado ao fim de 27 horas. Teste ao parâmetro scale Parameter.





# **EFEITOS DE ESCALA EM MODELAÇÃO NUMÉRICA DA EROSÃO DE UM PERFIL DE PRAIA**

## **Anexo C: Comparações**



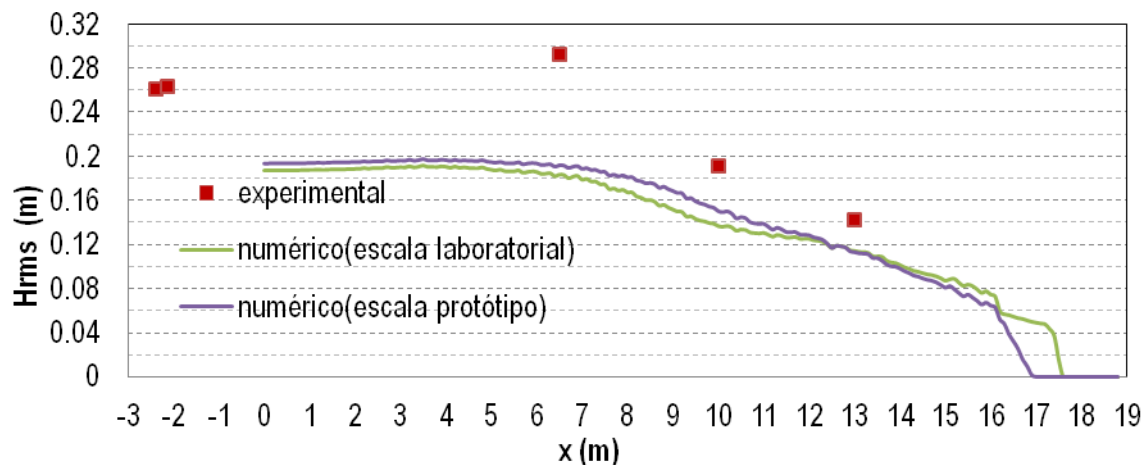


Figura 75 - Comparação entre os resultados experimentais e os resultados numéricos (na escala laboratorial e na escala do protótipo) da variável Hrms, para o caso default.

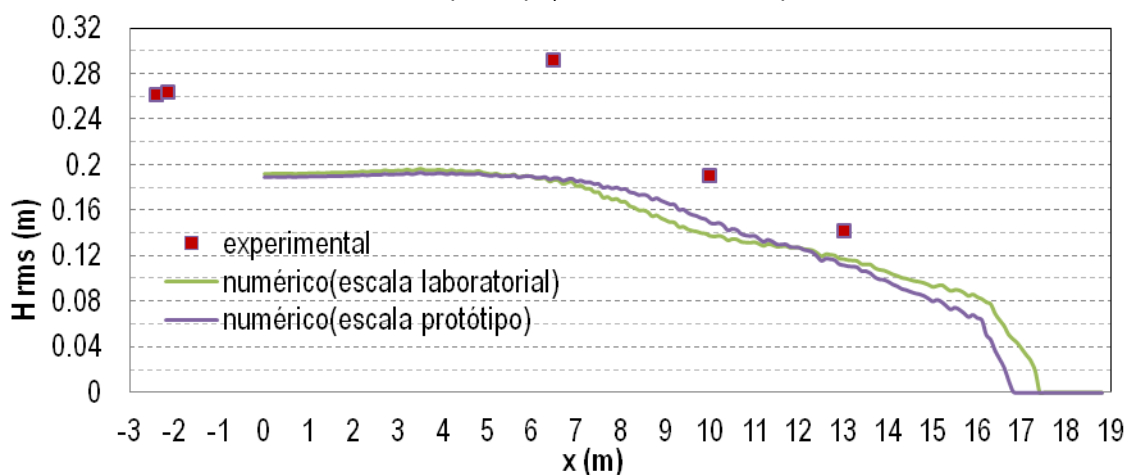


Figura 76 - Comparação entre os resultados experimentais e os resultados numéricos (na escala laboratorial e na escala do protótipo) da variável Hrms. Teste ao parâmetro gamma1.

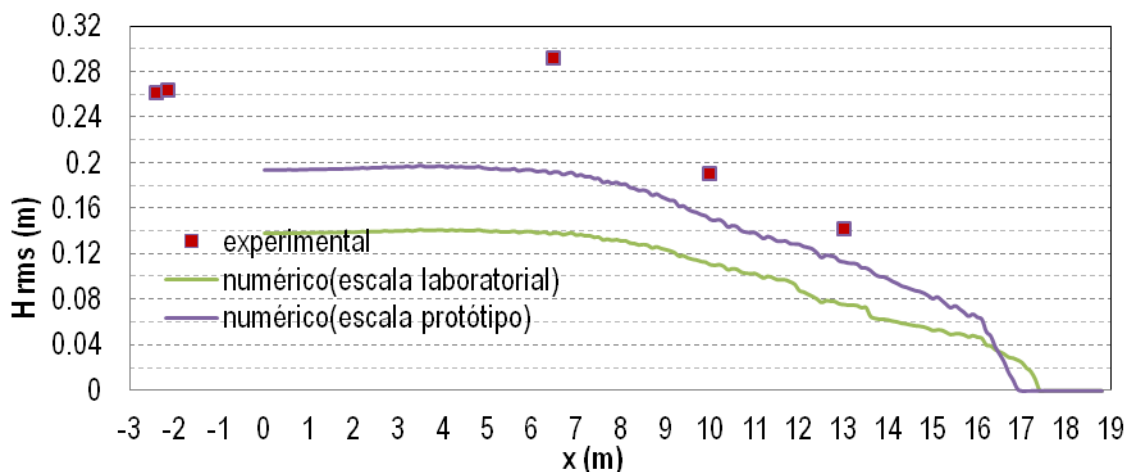


Figura 77 - Comparação entre os resultados experimentais e os resultados numéricos (na escala laboratorial e na escala do protótipo) da variável Hrms. Teste ao parâmetro gamma2.

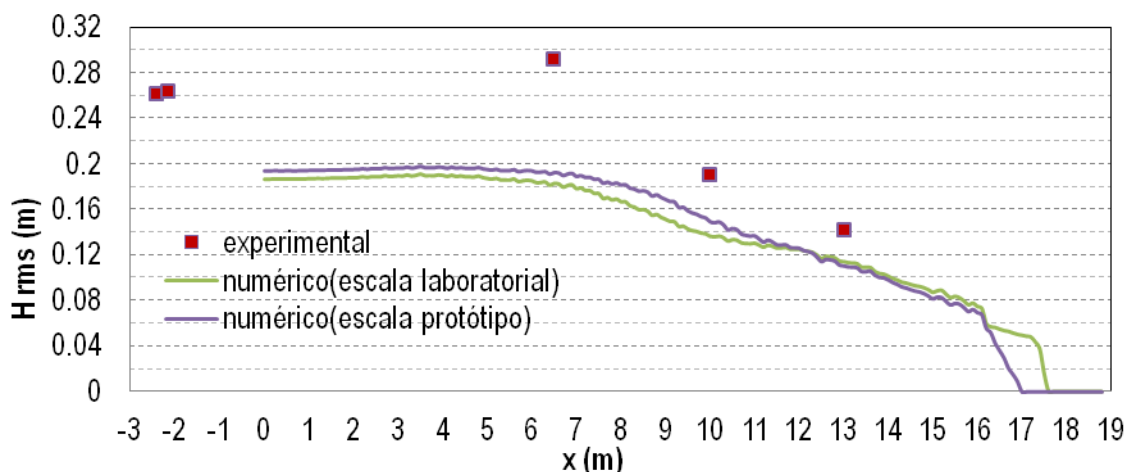


Figura 78 - Comparação entre os resultados experimentais e os resultados numéricos (na escala laboratorial e na escala do protótipo) da variável  $H_{rms}$ . Teste ao parâmetro beta.

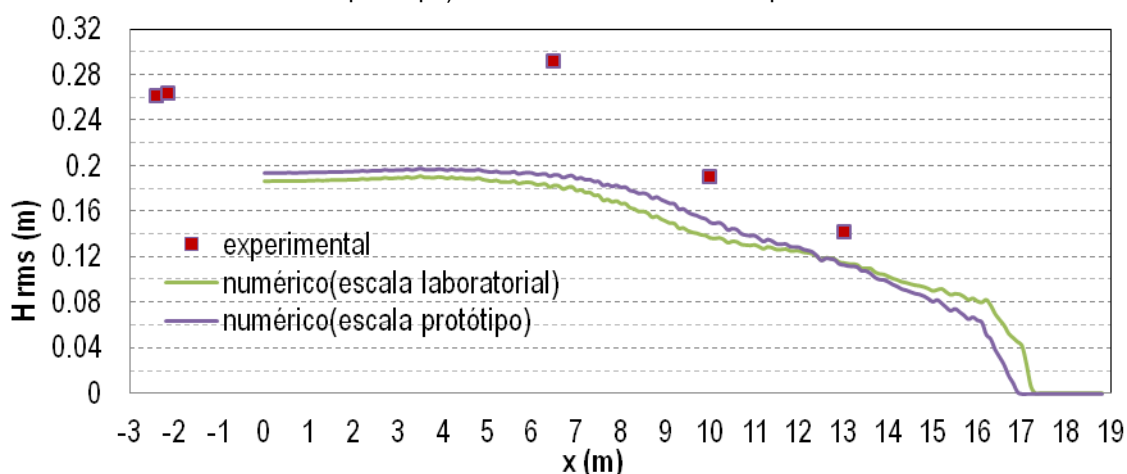


Figura 79 - Comparação entre os resultados experimentais e os resultados numéricos (na escala laboratorial e na escala do protótipo) da variável  $H_{rms}$ . Teste ao parâmetro max angle.

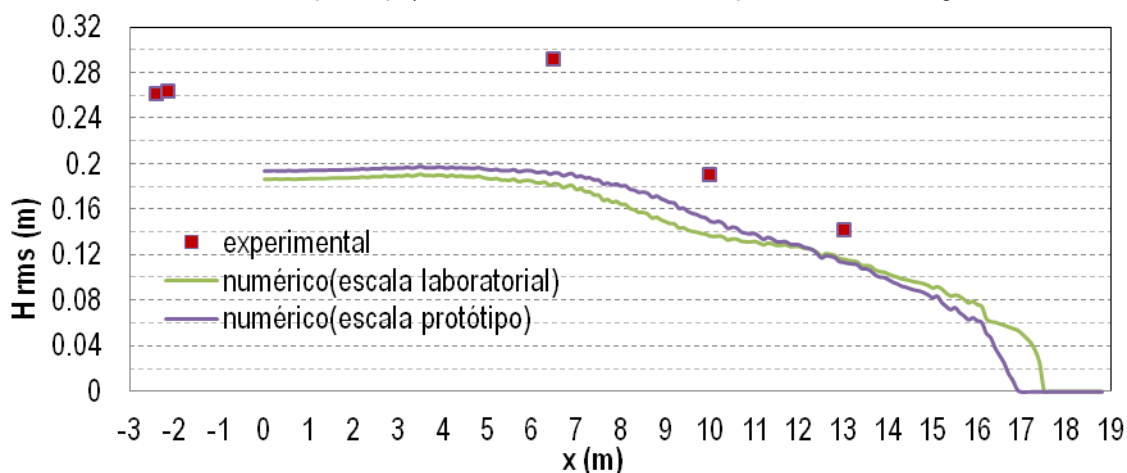


Figura 80 - Comparação entre os resultados experimentais e os resultados numéricos (na escala laboratorial e na escala do protótipo) da variável  $H_{rms}$ . Teste ao parâmetro scale parameter.

