



Universidade de Aveiro Departamento de Engenharia Civil
2010

**Eliana Maria
Araújo Oliveira**

EROSÃO, DEPOSIÇÃO E TRANSPORTE SEDIMENTAR NA RIA DE AVEIRO



Universidade de Aveiro Departamento de Engenharia Civil
2010

**Eliana Maria
Araújo Oliveira**

EROSÃO, DEPOSIÇÃO E TRANSPORTE SEDIMENTAR NA RIA DE AVEIRO

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção de grau de Mestre em Engenharia Civil, realizada sob a orientação científica do Doutor Carlos Daniel Borges Coelho, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro e co-orientação da Doutora Margarida João Fernandes de Pinho Lopes, Professora Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro.

Esta tese é dedicada:

Aos meus pais.

o júri

presidente

Prof. Doutor Aníbal Guimarães Da Costa
professor catedrático da Universidade de Aveiro

Doutora Filipa Simões de Brito Ferreira Oliveira
investigadora auxiliar do Laboratório Nacional de Engenharia Civil

Prof. Doutor Carlos Daniel Borges Coelho
professor auxiliar da Universidade de Aveiro

Prof.^a Doutora Margarida João Fernandes de Pinho Lopes
professora auxiliar da Universidade de Aveiro

agradecimentos

A todos os que me acompanharam durante esta fase da minha vida através da sua disponibilidade, compreensão e amizade, e que de forma directa ou indirecta contribuíram para a realização deste trabalho, desejo expressar aqui o meu profundo reconhecimento e agradecimento.

Ao orientador Carlos Coelho, quero expressar o meu agradecimento pelos seus ensinamentos, dedicação, partilha de conhecimentos técnico-científicos e, principalmente, amizade e paciência que me permitiu a elaboração deste trabalho e a minha formação como engenheira.

À co-orientadora Margarida Lopes, quero agradecer de igual forma, o apoio prestado.

Aos meus pais Mário Silva e Maria Fernanda Alves, agradeço de uma forma muito especial, o amor e o carinho que incondicionalmente me dedicam, a compreensão que sempre demonstraram e o permanente incentivo nos momentos mais difíceis, bem como todo o esforço feito para que este trabalho hoje exista.

Às minhas amigas Ana Silva, Eduarda Reis e Mafalda Pereira, pela compreensão e amizade, bem como partilha de emoções e conhecimento ao longo desta fase da minha vida.

À Mestre Ana Picado, pela disponibilidade que demonstrou para me auxiliar na obtenção de resultados por aplicação do modelo numérico ELCIRC, fundamental, para alcançar o objectivo final desta dissertação.

Ao Projecto PTDC/ECM/65589/2006 com o título: Murano – Muros das Marinhas de Sal de Aveiro, quero agradecer o apoio na recolha de dados.

A todos os mencionados e aqueles que não mencionei a minha mais profunda gratidão.

palavras-chave

Ria de Aveiro, sedimentos coesivos, sedimentos não-coesivos, deposição, erosão, transporte sedimentar.

resumo

A Laguna de Aveiro define-se, hoje, como sendo bastante alongada e ramificada, com um comprimento de cerca de 45 km segundo o seu eixo longitudinal e com 10 km de extensão na zona mais larga. Uma barreira extensa de areia separa o mar da Laguna. Esta barreira é de largura variável, dependendo de fenómenos como a erosão, disponibilidade e deposição de sedimentos (Araújo, 2005).

De forma a efectuar a caracterização hidrodinâmica e de transporte sedimentar de diversos locais da Ria de Aveiro, escolheram-se 30 estações de estudo divididas em duas classes, consoante o tipo de sedimentos predominantes nas respectivas secções. Os sedimentos podem ser coesivos (silto-argilosos) ou não-coesivos (areias). No capítulo 2, descrevem-se as formulações adoptadas para estimar os mecanismos de deposição e de erosão de sedimentos coesivos, e o transporte total sólido, resultante da soma do caudal sólido por arrastamento e do caudal sólido em suspensão.

No terceiro capítulo, explica-se de forma sucinta o modelo numérico ELCIRC, através do qual se obtêm parâmetros da Ria de Aveiro directamente utilizados nos cálculos e caracterizam-se as estações escolhidas para análise, em termos de litologia, alturas e velocidades de escoamento, sentido do escoamento e marés relevantes na investigação. As propriedades dos sedimentos e do escoamento nos vários pontos de estudo são referidas no capítulo 4.

Os resultados obtidos são descritos no capítulo 5, através da análise de gráficos representativos das taxas de deposição, erosão e caudal sólido total, obtidos nas marés mais relevantes; da interpretação das tabelas resumo, onde se encontram os totais das taxas para as 720 horas (mês) de investigação para cada estação; e da comparação dos resultados com os aferidos de trabalhos da JAPA, em 1989.

Para além do capítulo 5 de análise de resultados, apresenta-se também um sexto capítulo onde se representam os mesmos tópicos de análise, mas para uma situação diferente de cálculo. Usam-se nestas estimativas novos valores do modelo ELCIRC obtidos para a situação fictícia de alagamento da zona das marinhas. Os muros são derrubados e o volume de água que aflui a esta zona é superior, sendo a velocidade máxima do escoamento também superior.

Para finalizar, no capítulo 7 expõem-se as conclusões e os desenvolvimentos que podem ser feitos no futuro, no seguimento deste trabalho de pesquisa. Conclui-se que na generalidade das estações com sedimentos coesivos há tendência para o assoreamento e que o caudal sólido total transportado nas estações com areias varia preferencialmente dos 1 a 270 m³ por metro de secção, num mês. O alagamento das marinhas aumenta o volume de sedimentos em transporte.

keywords

Ria de Aveiro, cohesive sediments, non-cohesive sediments, deposition, erosion, sediment transport.

abstract

Aveiro's lagoon is, nowadays, a very long and ramified area, with about 45 km of length and 10km of width in its larger zone. A very long sand barrier separates the sea from the lagoon. This barrier has variable width, depending on certain phenomena such as erosion, availability and deposition of sediments (Araújo, 2005).

In order to perform the hydrodynamic and sediment transport characterization of several places of the Ria de Aveiro, 30 study points divided in two classes were chosen, according to the type of predominant sediments of those sections. The sediments can be cohesive (silty-clay) or non-cohesive (sand). In chapter 2, it is described the adopted formulations to estimate the deposition and erosion mechanisms of cohesive sediments, and the global solid transport, result of the solid flow due to dragging and the solid flow due to suspension. In the third chapter, it is explained succinctly the numeric model ELCIRC, through which the parameters of Ria de Aveiro, used directly in the calculations, are obtained, and the points chosen for analysis are characterized, in terms of lithology, flow velocities and highs, flow direction and tides that are relevant for the study. Sediments' properties and flow's properties at the several study points are presented in chapter 4.

The results from the studies are described in chapter 5, through the analysis of charts, that represent the deposition rate, erosion and global solid flow, obtained from the most relevant tides; through the interpretation of summary tables, that gather all the rates for the 720 hours (month) of study, for each section; and through the comparison between this results and the ones obtained by JAPA, in 1989.

There is also a sixth chapter where the same analysis topics are applied to a different situation. Here, new values from the ELCIRC model are used, obtained for a theoretical situation of marines' salt flooding. The marines' walls are knocked down and the water volume that reaches those areas is bigger, as is its maximum flow velocity.

Finally, chapter 7 presents the conclusions of this study and future developments that may follow. It was concluded that, in the majority of the stations with cohesive sediments, there's a tendency to occur siltation; and that the global solid flow, transported in the stations with sand, is within a range of 1 to 270 m³ per meter of section, per month. The marine's salt flooding increases the volume of sediment transport.

ÍNDICE

Índice	i
Lista de Símbolos	v
Índice de Figuras	ix
Índice de Tabelas	xiii
Capítulo 1	1
1. Introdução.....	3
1.1. Enquadramento.....	3
1.2. Objectivos.....	5
1.3. Preâmbulo.....	6
Capítulo 2	7
2. Fenómenos de Erosão, Deposição e Transporte de Sedimentos	9
2.1. Sedimentos coesivos.....	9
2.1.1. Deposição	10
2.1.2. Erosão	16
2.2. Sedimentos não-coesivos.....	18
2.2.1. Transporte sólido por arrastamento	19
2.2.2. Transporte sólido em suspensão	22
2.2.3. Transporte sólido total	26
Capítulo 3	27
3. Modelo numérico.....	29
3.1. Localização das estações	30
3.2. Avaliação de cenários de maré	31
3.3. Altura média do escoamento (h).....	32
3.4. Velocidade média do escoamento (U).....	33
3.5. Sentido do escoamento	35
Capítulo 4	37
4. Características da Ria de Aveiro	39
4.1. Propriedades dos sedimentos.....	39
4.1.1. Pesos volúmicos	39
4.1.2. Litologia da Ria de Aveiro	39
4.1.3. Diâmetro mediano de peneiração (D50).....	43

4.1.4.	Concentração de matéria particulada em suspensão (C_s).....	43
4.1.5.	Velocidade de queda (w).....	44
4.1.6.	Tensão tangencial crítica de deposição ($\tau_{d,total}$)	44
4.1.7.	Tensão tangencial crítica de erosão superficial ($\tau_{cr,es}$).....	44
4.2.	Propriedades do escoamento	46
4.2.1.	Coeficiente de rugosidade de Manning (n).....	47
4.2.2.	Velocidade de atrito junto ao fundo (u_*).....	47
4.2.3.	Tensão tangencial no fundo (τ).....	47
4.2.4.	Raio hidráulico	47
Capítulo 5.....		51
5.	Análise de resultados	53
5.1.	Comportamento de sedimentos coesivos	53
5.1.1.	Erosão e deposição ao longo dos ciclos de maré	53
5.1.2.	Resumo.....	54
5.1.3.	Distribuição geográfica da deposição e da erosão na Ria de Aveiro	57
5.2.	Comportamento de sedimentos não-coesivos	61
5.2.1.	Transporte sedimentar ao longo dos ciclos de maré	61
5.2.2.	Resumo.....	62
5.2.3.	Distribuição geográfica do balanço do caudal sólido total na Ria de Aveiro ..	66
5.3.	Análise global	68
Capítulo 6.....		73
6.	Análise dos resultados da “versão alagada”.....	75
6.1.	Comportamento de sedimentos coesivos	75
6.1.1.	Erosão e deposição ao longo dos ciclos de maré	75
6.1.2.	Resumo.....	75
6.2.	Comportamento de sedimentos não-coesivos	78
6.2.1.	Transporte sedimentar ao longo dos ciclos de maré	78
6.2.2.	Resumo.....	79
6.3.	Análise Global.....	83
Capítulo 7.....		87
7.	Disposições finais	89
7.1.	Conclusões	89
7.2.	Desenvolvimentos futuros.....	92
Referências bibliográficas.....		95

Anexos.....	99
Anexo A – Massas específicas dos materiais.....	I
Anexo B – Tabela representativa dos valores do ELCIRC.....	III
Anexo C – Gráficos de sedimentos coesivos.....	V
Anexo D – Gráficos de sedimentos não-coesivos	XXIII

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Constante de Nicholson e O'Connor	$N/m^{5/2}/kg^{3/2}$
B	Constante de Nicholson e O'Connor	-
C'	Parcela do coeficiente de Chézy associada a k'	-
C _a	Concentração de referência observada à distância z _a do fundo	mm
C _s	Concentração de matéria particulada em suspensão	g/l
D*	Parâmetro adimensional que caracteriza o diâmetro do material do fundo	-
D _n	Diâmetro de peneiração tal que n % em peso é mais fino	mm
D _s	Diâmetro representativo do material transportado em suspensão	mm
Ei	Estações de estudo na Ria de Aveiro	-
F _r	Variável auxiliar definida por Van Rijn	-
K	Constante empírica	-
M _{es}	Constante da taxa de erosão superficial	$g/m^2/s$
P _d	Probabilidade de deposição	-
Q _d	Taxa de deposição total	$g/m^2/s$
Q _{es}	Taxa de erosão superficial	$g/m^2/s$
R	Raio hidráulico	m
T	Parâmetro adimensional de capacidade de transporte	-
U	Velocidade média do escoamento	m/s
Y _{cr}	Parâmetro adimensional de Shields	-
a _{es}	Constante de Hwang e Mehta	-
b _{es}	Constante de Hwang e Mehta	-
c _{es}	Constante de Hwang e Mehta	-
e	Índice de vazios	-
g	Aceleração da gravidade	m^2/s
h	Altura média do escoamento	m
i	Declive do fundo	%
m	Constante empírica	-
n	Coefficiente de rugosidade de Manning	$s/m^{1/3}$
q _b	Caudal sólido arrastado por unidade de largura	m^3/s

q_s	Caudal sólido em suspensão por unidade de largura	m^3/s
q_t	Caudal sólido total por unidade de largura	m^3/s
s	Densidade do grão das partículas	-
u_*	Velocidade de atrito junto ao fundo	m/s
u_{*c}	Velocidade de atrito junto ao fundo correspondente ao início do transporte sólido	m/s
u'_{*}	Velocidade de atrito junto ao fundo associada ao escoamento sobre leito plano	m/s
w_s	Velocidade de queda	m/s
y'_{*}	Número de Rouse corrigido segundo Van Rijn	-
z_a	Distância do fundo para a qual se supõe conhecida a concentração de referência	m
β'	Razão entre o coeficiente de difusão de sedimentos e a viscosidade aparente	-
γ	Peso volúmico do solo	kN/m^3
γ_d	Peso volúmico do solo seco	kN/m^3
γ_s	Peso volúmico do grão do material sólido	kN/m^3
γ_w	Peso volúmico da água	kN/m^3
Δ	Altura das configurações de fundo	m
κ	Rugosidade absoluta equivalente de Nikuradse	-
ν	Viscosidade cinemática da água	m^2/s
ρ_l	Constante de Hwang e Mehta	g/cm^3
ρ_m	Massa volúmica molhada do depósito	kg/m^3
ρ_{rd}	Massa volúmica da camada recém depositada	kg/m^3
ρ_s	Massa volúmica seca	kg/m^3
ρ_w	Massa volúmica da água	kg/m^3
σ_D	Coefficiente de graduação	-
τ	Tensão tangencial no fundo	N/m^2
τ_0	Tensão média de arrastamento no fundo	N/m^2
τ_c	Tensão crítica de arrastamento	N/m^2
$\tau_{cr,es}$	Tensão tangencial crítica de erosão superficial	N/m^2
$\tau_{d,total}$	Tensão tangencial crítica de deposição total	N/m^2

τ_{rd}	Tensão tangencial crítica de uma camada recém depositada	N/m ²
ϕ'	Correcção introduzida por Van Rijn no número de Rouse	-

ÍNDICE DE FIGURAS

Capítulo 1

Figura 1.1: Ria de Aveiro (Marinheiro, 2008).	3
---	---

Capítulo 2

Figura 2.1: Ciclo de deposição e ressuspensão de sedimentos coesivos (adaptado de Maggi, 2005).	9
---	---

Capítulo 3

Figura 3.1: Grelha horizontal da Ria de Aveiro.	29
Figura 3.2: Estações de estudo.	31
Figura 3.3: Gráfico de sobreposição de velocidades de escoamento.	32
Figura 3.4: Valores mínimos de altura e velocidade do escoamento.	33
Figura 3.5: Valores máximos de altura e velocidade do escoamento.	34
Figura 3.6: Valores médios de altura e velocidade do escoamento.	34
Figura 3.7: Sentido do escoamento em período de enchente de maré.	35

Capítulo 4

Figura 4.1: Litologia (adaptada de Abrantes, 2005).	41
Figura 4.2: Concentração de matéria particulada e tensão crítica de deposição.	46
Figura 4.3: Maré Morta e Viva.	48
Figura 4.4: Maré Média.	48
Figura 4.5: Maré Viva.	49

Capítulo 5

Figura 5.1: Taxas de deposição de sedimentos coesivos.	59
Figura 5.2: Taxas de erosão de sedimentos coesivos.	60
Figura 5.3: Balanço do caudal sólido total nas 22 estações de estudo.	67
Figura 5.4: Representação das Taxas de deposição, de erosão e caudal sólido total.	69
Figura 5.5: Taxas de transporte líquidas.	70

Capítulo 6

Figura 6.1: Representação das Taxas de deposição, de erosão e caudal sólido total.	83
Figura 6.2: Taxas de transporte líquidas.	85

Anexo C

Figura C1: Taxas de deposição e erosão, altura e velocidade de escoamento na E6.	V
Figura C2: Taxas de deposição e erosão, altura e velocidade de escoamento na E8.	VI

Figura C3: Taxas de deposição e erosão, altura e velocidade de escoamento na E9.....	VII
Figura C4: Taxas de deposição e erosão, altura e velocidade de escoamento na E10.....	VIII
Figura C5: Taxas de deposição e erosão, altura e velocidade de escoamento na E11.....	IX
Figura C6: Taxas de deposição e erosão, altura e velocidade de escoamento na E12.....	X
Figura C7: Taxas de deposição e erosão, altura e velocidade de escoamento na E13.....	XI
Figura C8: Taxas de deposição e erosão, altura e velocidade de escoamento na E15.....	XII
Figura C9: Taxas de deposição e erosão, altura e velocidade de escoamento na E22.....	XIII
Figura C10: Taxas de deposição e erosão, altura e velocidade de escoamento na E23.....	XIV
Figura C11: Taxas de deposição e erosão, altura e velocidade de escoamento na E24.....	XV
Figura C12: Taxas de deposição e erosão, altura e velocidade de escoamento na E25.....	XVI
Figura C13: Taxas de deposição e erosão, altura e velocidade de escoamento na E26.....	XVII
Figura C14: Taxas de deposição e erosão, altura e velocidade de escoamento na E27.....	XVIII
Figura C15: Taxas de deposição e erosão, altura e velocidade de escoamento na E28.....	XIX
Figura C16: Taxas de deposição e erosão, altura e velocidade de escoamento na E29.....	XX
Figura C17: Taxas de deposição e erosão, altura e velocidade de escoamento na E30.....	XXI
Anexo D	
Figura D1: Variação do caudal sólido, altura e velocidade de escoamento na E1.....	XXIII
Figura D2: Variação do caudal sólido, altura e velocidade de escoamento na E2.....	XXIV
Figura D3: Variação do caudal sólido, altura e velocidade de escoamento na E3.....	XXV
Figura D4: Variação do caudal sólido, altura e velocidade de escoamento na E4.....	XXVI
Figura D5: Variação do caudal sólido, altura e velocidade de escoamento na E5.....	XXVII
Figura D6: Variação do caudal sólido, altura e velocidade de escoamento na E7.....	XXVIII
Figura D7: Variação do caudal sólido, altura e velocidade de escoamento na E14.....	XXIX
Figura D8: Variação do caudal sólido, altura e velocidade de escoamento na E16.....	XXX
Figura D9: Variação do caudal sólido, altura e velocidade de escoamento na E17.....	XXXI
Figura D10: Variação do caudal sólido, altura e velocidade de escoamento na E18.	XXXII
Figura D11: Variação do caudal sólido, altura e velocidade de escoamento na E19.	XXXIII
Figura D12: Variação do caudal sólido, altura e velocidade de escoamento na E20.	XXXIV
Figura D13: Variação do caudal sólido, altura e velocidade de escoamento na E21.	XXXV
Figura D14: Variação do caudal sólido, altura e velocidade de escoamento na E22.	XXXVI
Figura D15: Variação do caudal sólido, altura e velocidade de escoamento na E23. ...	XXXVII
Figura D16: Variação do caudal sólido, altura e velocidade de escoamento na E24. ..	XXXVIII
Figura D17: Variação do caudal sólido, altura e velocidade de escoamento na E25.	XXXIX
Figura D18: Variação do caudal sólido, altura e velocidade de escoamento na E26.	XL

Figura D19: Variação do caudal sólido, altura e velocidade de escoamento na E27..... XLI
Figura D20: Variação do caudal sólido, altura e velocidade de escoamento na E28..... XLII
Figura D21: Variação do caudal sólido, altura e velocidade de escoamento na E29..... XLIII
Figura D22: Variação do caudal sólido, altura e velocidade de escoamento na E30..... XLIV

ÍNDICE DE TABELAS

Capítulo 2

Tabela 2.1: Velocidade de queda em estuários e baías.....	12
Tabela 2.2: Rugosidade n ($s/m^{1/3}$), para canais artificiais abertos (adaptado de Fialho, 2006).	15
Tabela 2.3: Rugosidade n ($s/m^{1/3}$), para rios e ribeiros (adaptado de Fialho, 2006).	15
Tabela 2.4: Rugosidade n ($s/m^{1/3}$), em função da altura de escoamento.	16
Tabela 2.5: Classificação das areias.	21

Capítulo 4

Tabela 4.1: Parâmetros físicos “in situ” dos solos aluvio-lodosos da região de Aveiro.	39
Tabela 4.2: Percentagem de material de estudo retido no peneiro nº 200.....	40
Tabela 4.3: Características das estações.	42
Tabela 4.4: Diâmetros limites em cada classe de areias (mm).....	43
Tabela 4.5: Propriedades dos sedimentos para estimativa das taxas de transporte.	45

Capítulo 5

Tabela 5.1: Totais de deposição e de erosão, em função das marés.....	54
Tabela 5.2: Totais de deposição e de erosão, num mês em função do sentido do escoamento.	55
Tabela 5.3: Totais brutos e líquidos da taxa de deposição e erosão.	56
Tabela 5.4: Balanço do caudal sólido total, no fim de 13 horas, consoante as marés.....	63
Tabela 5.5: Caudal sólido em suspensão e arrastamento, ao fim de um mês.....	64
Tabela 5.6: Transporte sedimentar total, ao fim de um mês.....	65
Tabela 5.7: Comparação de resultados.	68

Capítulo 6

Tabela 6.1: Totais de deposição e de erosão, em função das marés.....	76
Tabela 6.2: Totais de deposição e de erosão, num mês em função do sentido do escoamento.	77
Tabela 6.3: Totais brutos e líquidos da taxa de deposição e erosão.	78
Tabela 6.4: Balanço do caudal sólido total, no fim de 13 horas, consoante as marés.....	80
Tabela 6.5: Caudal sólido em suspensão e arrastamento, ao fim de um mês.....	81
Tabela 6.6: Transporte sedimentar total, ao fim de um mês.....	82

Capítulo 1

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento

A Laguna de Aveiro define-se, hoje, como sendo bastante alongada e ramificada, com um comprimento de 45 km segundo o seu eixo longitudinal e com cerca de 10 km de extensão na zona mais larga. Uma barreira extensa de areia separa o mar da Laguna. Esta barreira é de largura variável, dependendo de fenómenos como a erosão, disponibilidade e deposição de sedimentos (Araújo, 2005).

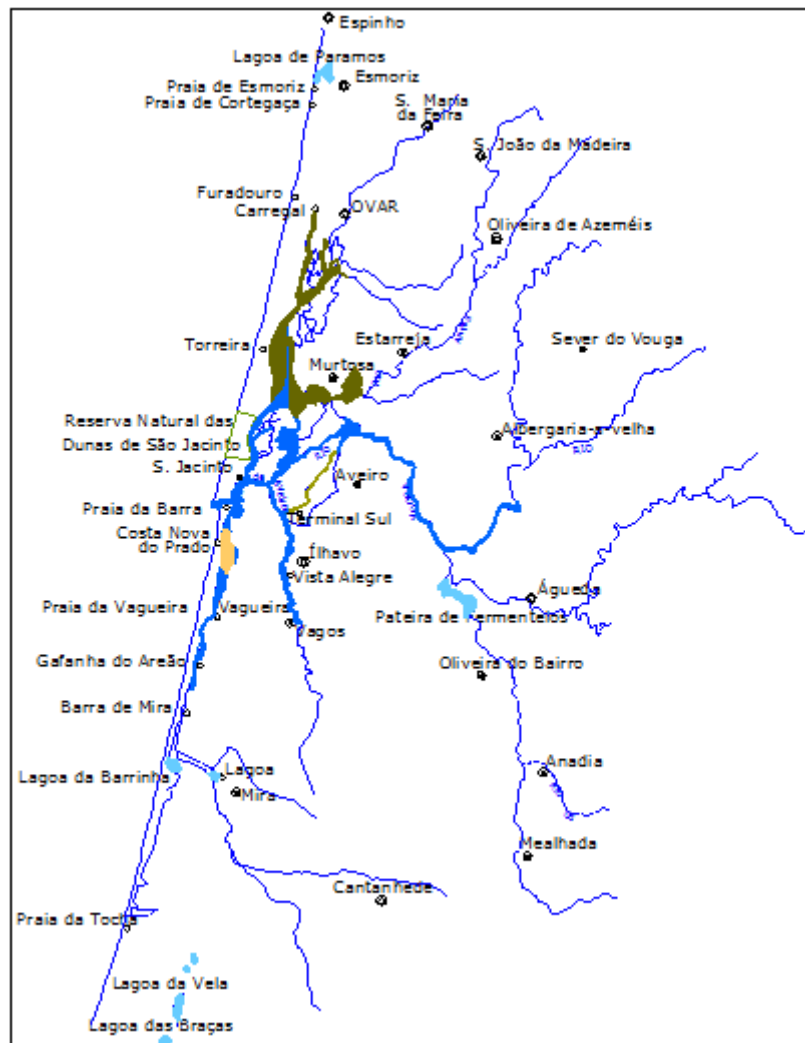


Figura 1.1: Ria de Aveiro (Marinheiro, 2008).

Assim, segundo Marinheiro (2008), a morfologia da Ria de Aveiro pode ser descrita como um sistema de canais de grande desenvolvimento longitudinal, organizados em forma arborescente por ramificações sucessivas, a partir do ponto único de comunicação com o mar (figura 1.1).

A Ria de Aveiro está ligada ao Oceano Atlântico por um canal estreito, com cerca de 1,3 km de comprimento, 350 m de largura e 20 m de profundidade, conhecido como a Barra de Aveiro. O fluxo máximo no canal de entrada é 4700 m³/s, 70 % fluindo para o Norte e 30 % fluindo para o Sul. Os canais do Norte são os mais importantes de um ponto de vista hidrodinâmico sendo os mais profundos e os maiores, caracterizando-se por fortes correntes, com valores superiores a 1 m/s durante as Marés Vivas (Marinheiro, 2008).

Segundo Lopes *et al.* (2001), de um ponto de vista geológico a Ria de Aveiro está situada na zona da placa do Mesozóico Ocidental Português, ocupando uma grande bacia sedimentar depositada numa placa do Paleozóico. A natureza e a distribuição dos sedimentos são extremamente variáveis, havendo uma grande diferença entre a composição dos sedimentos do Norte e do Sul da Laguna. A composição granulométrica varia entre 20 % a 90 % de areias nos canais do Sul, para 10 % a 80 % em lodos, em outros canais. Em suma, os canais do Norte (S. Jacinto e Ovar) são caracterizados principalmente por sedimentos finos coesos, enquanto as areias predominam nos canais do Sul.

A contribuição de água doce é derivada de dois grandes rios, o Vouga e o Antuã, cuja via de saída é o lado leste da Laguna. Estes rios contribuem com uma grande quantidade de sedimentos e detritos orgânicos para o equilíbrio sedimentar da Laguna. A entrada de matéria seca total (inorgânicos e orgânicos) com base no fluxo médio do rio é estimada na ordem das mil toneladas por ano (Lopes *et al.*, 2001).

Com o decorrer dos anos, a Ria de Aveiro tem sofrido evidentes modificações ao nível das condições hidrodinâmicas, contribuindo para tal, entre outros factores, as alterações das características do canal da Barra (aprofundamento). De acordo com Coelho *et al.* (2008), os diversos factores proporcionaram alterações ao nível das amplitudes de maré, das velocidades de corrente e da salinidade da água dentro da Laguna.

Como consequência destas alterações há o desgaste da superfície exposta à acção erosiva da água, tanto mais activo e importante quanto maior o volume de água e a sua velocidade (escavação do fundo dos canais). O embate das águas (fluxo e refluxo) nas margens provoca o desagregamento de material, permanecendo este suspenso e sendo depositado

posteriormente.

Um dos pontos na Laguna de Aveiro onde são evidentes as mudanças, são as marinhas de sal, mais propriamente os muros que definem os contornos das ilhas onde se procedia à actividade de recolha do sal. Estas estruturas, tradicionalmente construídas em terra, têm sofrido uma degradação acentuada, alterando de forma significativa a imagem da Ria e o comportamento hidrodinâmico dos seus canais (Coelho *et al.*, 2008).

1.2. Objectivos

O principal objectivo a alcançar com a realização deste trabalho é a caracterização hidrodinâmica e de transporte sedimentar de diversos locais da Ria de Aveiro. Esta caracterização engloba a identificação dos mecanismos de deposição, de erosão e de caudal sólido total de sedimentos transportados (coesivos e não coesivos), e escolha dos métodos de cálculo adequados à situação de estudo. Pretendia-se ponderar acerca dos diferentes valores de parâmetros publicados, analisando a sensibilidade das fórmulas adoptadas. Um dos principais objectivos foi avaliar o comportamento hidrodinâmico e sedimentar da Ria ao longo dos ciclos de maré e compreender o impacto de um cenário de alteração das condições da Ria.

Para tal, foram seleccionadas 30 estações devidamente identificadas em toda a extensão da Laguna, com especial relevo (maior concentração de estações de estudo) numa área específica da Ria de Aveiro (próxima das marinhas de sal). Nestas estações foi quantificada a erosão e a deposição para estações com predominância de fundo argiloso e o caudal sólido total foi estimado para as estações em que a maioria dos sedimentos são arenosos.

Foi ainda objectivo esquematizar os resultados obtidos, tentando classificar toda a Laguna, em intervalos de valores no que refere à erosão, deposição e transporte sólido total de sedimentos.

Depois de esquematizados os resultados da hidrodinâmica em toda a Ria de Aveiro, efectuaram-se os mesmos cálculos, para as mesmas estações, mas com dados da Ria de Aveiro para uma situação limite, ou seja, estando a zona das marinhas (E22 à E30) completamente alagada. Os muros das marinhas são teoricamente derrubados e o nível da água sobe nesta zona. Pretendeu-se compreender o impacto do alagamento nos restantes canais da Laguna, ou seja, nas secções de estudo escolhidas.

1.3. Preâmbulo

No presente capítulo apresenta-se uma breve introdução com a descrição generalizada da Ria de Aveiro, dos tipos de sedimentos que predominam na Laguna e a sua distribuição, e das alterações que a Ria tem sofrido até aos dias de hoje. No capítulo 1 expõem-se ainda os objectivos pretendidos com a realização deste trabalho e uma descrição sucinta do conteúdo de cada um dos capítulos de desenvolvimento e resultados.

No capítulo 2 descrevem-se as formas adoptadas para estimar os mecanismos de deposição e de erosão de sedimentos coesivos, e o transporte total sólido de sedimentos não-coesivos, resultante da soma do caudal sólido por arrastamento e do caudal sólido em suspensão.

Já nesta fase de desenvolvimento do tema, apresenta-se o capítulo 3, onde se explica o modelo numérico ELCIRC, através do qual se obtêm parâmetros da Ria de Aveiro directamente utilizados nos cálculos e caracterizam-se ainda as estações escolhidas para análise, em termos de litologia, alturas e velocidades de escoamento, sentido do escoamento e marés relevantes na investigação.

Por sua vez, no capítulo 4 apresentam-se as propriedades dos sedimentos e do escoamento necessários ao cálculo, a forma de os obter e numa tabela resumo o valor conseguido para os principais parâmetros, que não variam ao longo do tempo, para cada ponto da Laguna.

Os resultados obtidos são descritos no capítulo 5, através da análise de gráficos representativos das taxas de deposição, erosão e caudal sólido total, obtidos nas marés mais relevantes; da interpretação das tabelas resumo, onde se encontram os totais das taxas para as 720 horas (mês) de investigação para cada estação; e da comparação dos resultados com os aferidos de trabalhos da JAPA, em 1989.

Apresenta-se também um 6º capítulo onde se representam os mesmos tópicos de análise do capítulo 5, mas para uma situação diferente de cálculo. Usam-se nestas estimativas novos valores do modelo ELCIRC obtidos para a situação de alagamento da zona das marinhas (E22 à E30), representando o rombo dos muros das marinhas, que passam a funcionar como grandes reservatórios de água, alterando as características hidrodinâmicas nos canais próximos.

Para finalizar, no capítulo 7 expõem-se as conclusões e os desenvolvimentos que podem ser feitos no futuro, no seguimento deste trabalho de pesquisa.

Capítulo 2

2. FENÓMENOS DE EROSIÃO, DEPOSIÇÃO E TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

Os sedimentos coesivos (2.1) são partículas de pequenas dimensões ($< 62 \mu\text{m}$) que apresentam características de agregação devido a forças físico-químicas de atracção entre as partículas. Movem-se em grupos em forma de flocos e agregados e normalmente são constituídos por argilas, detritos orgânicos e inorgânicos e bactérias. [1]

Por seu lado, as areias fazem parte da categoria dos sedimentos não-coesivos (2.2), movimentam-se individualmente sob a acção hidrodinâmica do escoamento e do seu peso próprio.

2.1. Sedimentos coesivos

Neste capítulo procede-se a uma breve descrição dos fenómenos de erosão e deposição de sedimentos coesivos.

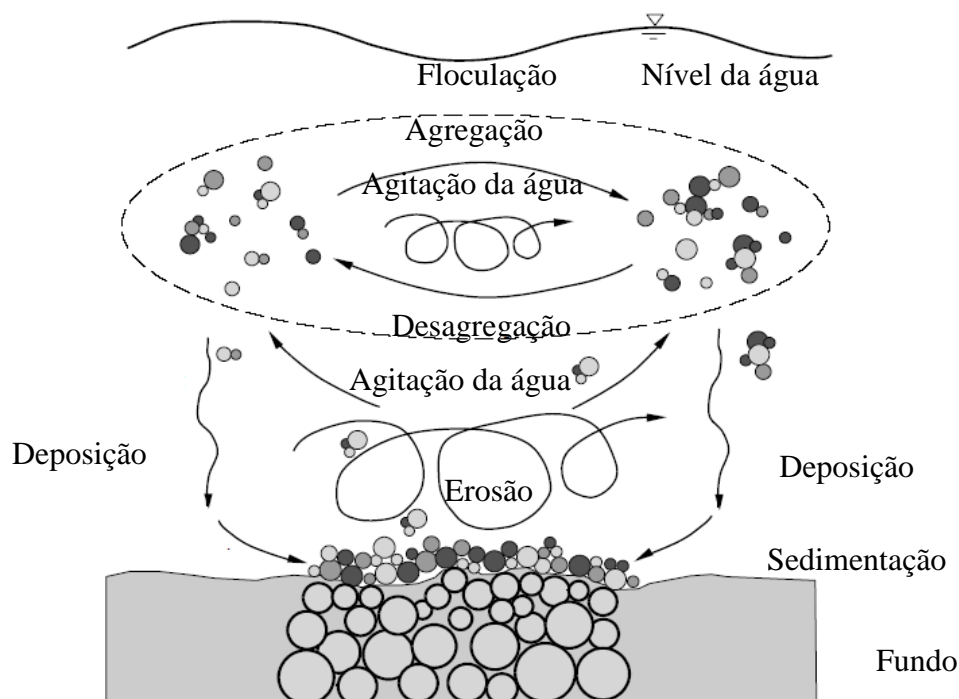


Figura 2.1: Ciclo de deposição e ressuspensão de sedimentos coesivos (adaptado de Maggi, 2005).

Segundo Mingxiao Xie *et al.* (2010), os sedimentos localizados em zonas de costa enlameada são geralmente finos e coesivos, e o seu transporte é dirigido pelas acções combinadas das ondas e de correntes. O processo de sedimentação é extremamente complicado e aparecem outros mecanismos associados tais como: floculação, consolidação, deposição e erosão.

Na figura 2.1, adaptada do trabalho realizado por Maggi em 2005, é possível observar, de forma simples, a conjugação da maioria dos mecanismos referidos.

Apesar da importância de todos os fenómenos, no âmbito deste trabalho será dado maior relevo aos mecanismos de deposição e erosão, para estimativa das taxas de transporte e posterior representação das condições actuais de transporte sedimentar que se verificam em toda a Laguna.

A análise de valores representativos dos diversos parâmetros e as expressões que permitem a estimativa de valores é apresentada de forma sucinta.

2.1.1. Deposição

Segundo Huang *et al.* (2006), Mehta e Partheniades efectuaram estudos em laboratório, sobre o comportamento dos sedimentos coesivos na deposição, verificando que esta é controlada pela tensão tangencial no fundo, por processos de turbulência em zonas perto do fundo, pela velocidade de queda das partículas, pelo tipo de sedimento, pela altura de água do escoamento, pela concentração de matéria particulada em suspensão e pela constituição iónica do fluido da suspensão.

De acordo com Huang *et al.* (2006), a deposição acontece quando a tensão tangencial no fundo é inferior a uma determinada tensão tangencial crítica de deposição. Desta forma, somente os flóculos com suficiente resistência ao corte é que suportam as tensões tangenciais no fundo, e se depositam.

A deposição de sedimentos coesivos pode ser de dois tipos: total e parcial. Quando a tensão tangencial no fundo (τ) é inferior à tensão tangencial crítica de deposição total ($\tau_{d,total}$), todas as partículas de sedimentos e flóculos são depositadas. A deposição parcial ocorre quando a tensão tangencial no fundo é superior à tensão tangencial crítica de deposição total, mas inferior à tensão tangencial crítica de deposição parcial. Neste intervalo de valores da tensão tangencial no fundo, os flóculos com ligações fortes são

depositados e os flóculos com ligações fracas permanecem em suspensão. Contudo, o conhecimento actual dos valores da tensão tangencial crítica de deposição total e parcial não são bem compreendidos (Huang *et al.*, 2006).

Para a quantificação da deposição, a taxa de deposição total (Q_d) pode ser estimada à custa da fórmula de Krone (expressão 2.01), ou através de levantamentos hidrográficos (JAPA, 1989).

De seguida apresentam-se os parâmetros necessários ao cálculo da taxa de deposição total, pela fórmula de Krone, a seleccionada para prosseguir no processo de cálculo. Esta equação depende da concentração de matéria particulada em suspensão (C_s), da velocidade de queda (w_s) e da probabilidade de deposição (P_d) (Alves, 2009).

$$Q_d = C_s \times w_s \times P_d \quad \tau \leq \tau_{d,total} \quad (2.01)$$

- **Concentração de matéria particulada em suspensão (C_s)**

Os valores de concentração de matéria particulada em suspensão podem ser estimados por ensaios laboratoriais, ou através de amostras recolhidas *in situ*.

Abrantes (2005), propôs uma forma de determinação da concentração de sedimentos, através de ensaios laboratoriais. Nesse trabalho, os valores encontrados de concentração de matéria particulada variam entre 2,36 e 74,96 mg/l. O estudo dos valores de concentração de matéria particulada em suspensão revelou-se mais exaustivo, pois Abrantes (2005), apresenta valores para várias situações de maré e dias distintos, em sete pontos da Laguna. Num trabalho desenvolvido por Silva em 1994, na zona da Murtosa e canal do Espinheiro a concentração de matéria particulada varia de 4,8 a 43,4 mg/l. Numa outra análise, Abrantes sugere que no canal do Espinheiro e São Jacinto os valores vão de 13,21 a 23,96 mg/l. Por fim, de acordo com a investigação levada a cabo em 2006 por Lopes *et al.*, na Baía do Laranjo e canal de Ovar os valores variam entre 40 e 160 mg/l (Costa e Coelho, 2010).

- **Velocidade de queda (w_s)**

A velocidade de queda pode ser estimada à custa de diferentes formulações ou de ensaios

laboratoriais efectuados a partir de sedimentos recolhidos na Ria de Aveiro, ou locais, com características semelhantes à Laguna em estudo.

Há formulações que estimam a velocidade de queda em situações de baixas concentrações de sedimentos e outras formulações que serão adequadas para qualquer valor de concentração (Alves, 2009). Neste trabalho, apenas os métodos de cálculo para baixas concentrações serão analisados, pois verifica-se ser essa a realidade da Ria de Aveiro.

De acordo com Alves (2009), Krone, Cole e Miles, Van Rijn e Van Leussen, adoptaram uma fórmula (2.02) que contém os mesmos parâmetros, mas cada autor referencia um valor distinto a aplicar a cada um desses parâmetros.

$$w_s = KC_s^m \quad (2.02)$$

Citando Alves (2009), o parâmetro K depende do tipo de sedimento e m varia de estuário para estuário. Krone propõe $K = 0,001$ e $m = 4/3$, Cole e Miles apontam valores de K entre 0,001 e 0,002 e $m = 1,0$ e para Van Rijn, o valor de m varia num intervalo de 1 a 2. Por seu lado, Van Leussen admite m entre 0,5 e 3,5.

Costa e Coelho (2010), referem velocidades de sedimentação em estuários e zonas costeiras, de sedimentos coesivos, obtidos por estudos experimentais, realizados por diversos autores, em todo o mundo.

Tabela 2.1: Velocidade de queda em estuários e baías.

Localização	Método	w_s (mm/s)
Estuário Elbe e Weser, Alemanha	<i>In situ</i> Owen Tubs	0,01-3,5
Estuário de Sem, Holanda	<i>In situ</i> settling tube	0,56-2,82
Estuário de Oosterschelde, Holanda	<i>In situ</i> settling tube	$\leq 10,0$
The Sound, Dinamarca e Suíça	<i>Sediments traps</i>	0,04
Glacier Bay, Alasca	<i>In situ</i> settling tube	2,21
Estuário de Eel River, EUA	Método de ajuste	0,06-0,10
Estuário Dollard, Holanda	Vídeo <i>in situ</i> (VIS)	2,70
Estuário Changjiang, China	Equação de Rouse	0,4-4,1

A tabela 2.1 mostra os locais onde foram recolhidas as amostras, o método utilizado para os ensaios e os intervalos de valores para a velocidade de queda.

As velocidades apresentadas na tabela 2.1 nunca vão além dos 10 mm/s, e a média dos valores ronda os 3 mm/s, ou seja, valores de velocidades de sedimentação reduzidos, em

comparação com os 40 mm/s apontados por Costa e Coelho (2010), para toda a Ria de Aveiro.

- **Probabilidade de deposição (P_d)**

Alves (2009), afirma que a probabilidade de deposição representa a probabilidade das partículas aderirem ao fundo e não voltarem a ser arrastadas pelo escoamento. Conforme referido por Huang *et al.* (2006), pode ser determinada em função de:

$$P_d = 1 - \frac{\tau}{\tau_{d,total}} \quad \tau \leq \tau_{d,total} \quad (2.03)$$

Para obtenção do valor de probabilidade de deposição, torna-se necessário calcular outros argumentos, que se definem em seguida.

- **Tensão tangencial no fundo (τ)**

A tensão tangencial no fundo pode ser estimada pela expressão 2.04, à custa da velocidade de atrito junto ao fundo e da massa volúmica da água (ρ_w).

$$\tau = \rho_w u_*^2 \quad (2.04)$$

- **Velocidade de atrito junto ao fundo (u_*)**

De várias formulações possíveis para o cálculo da velocidade de atrito junto ao fundo, adoptou-se, a expressão 2.05 que Nezu e Rodi desenvolveram (Trento, 2005).

$$u_* = U \times \frac{n \times g^{1/2}}{h^{1/6}} \quad (2.05)$$

Nesta expressão, a velocidade de atrito junto ao fundo depende da velocidade média de escoamento, da altura da coluna de água e da rugosidade do fundo.

- **Altura média do escoamento (h)**

Os valores da altura de escoamento são variáveis para cada canal da Ria, e ao longo dos ciclos de maré. É possível ter uma ordem de grandeza através de valores publicados para a Laguna de Aveiro, ou através de sistemas com características semelhantes. Através de modelação numérica consegue-se estimar valores para os diferentes locais da Ria, ao longo dos ciclos de maré.

- **Velocidade média do escoamento (U)**

A velocidade média de escoamento pode ser estimada por medições pontuais nos diversos canais da Ria. No entanto, uma noção do comportamento na Laguna pode ser obtida de valores publicados. A modelação permite uma avaliação do comportamento de todo o sistema.

Estudos feitos por Lopes e Dias em 2007, resultam na sugestão de um valor de velocidade de corrente máxima de 2 m/s para os Canais de São Jacinto e Espinheiro e Vaz *et al.* em trabalhos desenvolvidos em 2009, apresentam valores de velocidade de corrente superiores a 2 m/s (Costa e Coelho, 2010).

Coelho *et al.* (2008), sugerem valores de velocidades de escoamento máximas para a embocadura e canal principal de 2,4 m/s, e para canais de menor dimensão velocidades superiores a 1 m/s.

- **Coefficiente de rugosidade de Manning (n)**

A resistência ao escoamento pode ser traduzida pelo coeficiente de rugosidade de Manning. Fialho sugeriu em 2006, segundo Alves (2009), alguns valores aqui apresentados nas tabelas 2.2 a 2.4.

A tabela 2.2 apresenta valores de rugosidade de Manning, consoante o tipo de parede existente em canais artificiais abertos, e as condições de escoamento. O valor mínimo de resistência ao escoamento é de $0,017 \text{ s/m}^{1/3}$ e a média dos valores para todas as condições de escoamento, ronda os $0,030 \text{ s/m}^{1/3}$.

Tabela 2.2: Rugosidade n ($s/m^{1/3}$), para canais artificiais abertos (adaptado de Fialho, 2006).

Natureza das Paredes	Condições de escoamento			
	Muito Boas	Boas	Regulares	Más
Canais de terra, rectilíneos e uniformes	0,017	0,020	0,023	0,025
Canais abertos em rocha, uniformes	0,025	0,030	0,033	0,035
Idem, irregulares; ou de paredes de pedras	0,035	0,040	0,045	-
Canais dragados	0,025	0,028	0,030	0,033
Canais curvilíneos e lamosos	0,023	0,025	0,028	0,030
Canais com leito pedregoso e vegetação nos taludes	0,025	0,030	0,035	0,040
Canais com fundo de terra e taludes empedrados	0,028	0,030	0,033	0,035

Por sua vez, a tabela 2.3 apresenta valores para rios e ribeiras divididos conforme a protecção das suas margens e a limpeza dos mesmos. O valor mínimo nestes casos já aumenta para os $0,025 s/m^{1/3}$ e a média para $0,053 s/m^{1/3}$.

Tabela 2.3: Rugosidade n ($s/m^{1/3}$), para rios e ribeiros (adaptado de Fialho, 2006).

Rios e Ribeiros	Condições de escoamento			
	Muito Boas	Boas	Regulares	Más
(a) Limpos, rectilíneos e uniformes	0,025	0,028	0,030	0,033
(b) Idem a (a), porém com vegetação e pedras	0,030	0,033	0,035	0,040
(c) Com meandros, bancos e poços pouco profundos, limpos	0,035	0,040	0,045	0,050
(d) Idem a (c), águas baixas, declividades fracas	0,040	0,045	0,050	0,055
(e) Idem a (c), com vegetação e pedras	0,033	0,035	0,040	0,045
(f) Idem a (d), com pedras	0,045	0,050	0,055	0,060
(g) Com margens espraiadas, pouca vegetação	0,050	0,060	0,070	0,080
(h) Com margens espraiadas, muita vegetação	0,075	0,100	0,125	0,150

Por último na tabela 2.4 sugerem-se valores de rugosidade de Manning, em função da profundidade do escoamento. É uma tabela de consulta simplificada, que permite obter a resistência ao escoamento para qualquer situação de escoamento, apresentando valores mínimos de $0,014 s/m^{1/3}$ e uma média de $0,019 s/m^{1/3}$.

Tabela 2.4: Rugosidade n ($s/m^{1/3}$), em função da altura de escoamento.

Profundidade	Valores de Rugosidade de Manning
$-1 \leq h < -0,5$	0,026
$-0,5 \leq h < 0,0$	0,024
$0,0 \leq h < 0,5$	0,022
$0,5 \leq h < 1,0$	0,020
$1,0 \leq h < 3,0$	0,018
$3,0 \leq h < 6,0$	0,016
$6,0 \leq h < 10,0$	0,015
$h \geq 10,0$	0,014

▪ **Tensão tangencial crítica de deposição ($\tau_{d,total}$)**

Inúmeras experiências foram realizadas para determinar os valores da tensão tangencial crítica de deposição total em sedimentos coesivos. Krone (de acordo com Huang *et al.*, 2006) nas experiências que efectuou nos sedimentos da baía de San Francisco (Estados Unidos da América), encontrou um valor de $\tau_{d,total} = 0,060 \text{ N/m}^2$ para valores de concentração inferiores a 0,3 g/l, e um valor de $\tau_{d,total} = 0,078 \text{ N/m}^2$ para valores de concentração entre 0,3 e 10 g/l. Mehta e Partheniades (de acordo com Huang *et al.*, 2006) descobriram que $\tau_{d,total}$ tomava o valor de $0,15 \text{ N/m}^2$, para a caulinite em água destilada. Segundo Huang *et al.* (2006), os valores de tensão tangencial crítica de deposição total variam entre 0,06 e $1,10 \text{ N/m}^2$, dependendo do tipo de sedimento e da respectiva concentração.

Citando Costa e Coelho (2010), o valor referido para a Ria de Aveiro por Lopes *et al.* (2000), e Lopes e Dias (2007), é de $0,1 \text{ N/m}^2$.

2.1.2. Erosão

Araújo (2004), refere que a erosão é caracterizada por dois parâmetros: pela erosão crítica, que corresponde à velocidade do escoamento a partir da qual começa a erosão, e pela taxa de erosão, que representa a quantidade de sedimentos que a erosão reduz num determinado tempo.

Segundo Alves (2009), a erosão ocorre quando a tensão tangencial no fundo é superior à tensão tangencial crítica de erosão superficial ($\tau_{cr,es}$). Mehta (de acordo com Alves, 2009), referiu que a erosão varia com a magnitude da tensão tangencial no fundo, apresentando vários modos de erosão dos sedimentos coesivos, nomeadamente, erosão superficial de

flóculos do fundo (ocorre flóculo por flóculo devido a quebras inter-partículas e ligações electromecânicas), erosão gravítica (ocorre uma falha geotécnica no fundo, fazendo com que os materiais acima dele fiquem suspensos no escoamento) e arrastamento de lama fluida (os sedimentos do fundo formam com a água uma mistura fluida, o que destabiliza a interface sedimento-água e, em seguida, a lama fluida é arrastada do fundo).

Como se verifica, a erosão dos sedimentos coesivos é um mecanismo complexo, pois depende de uma série de factores, o que leva a que as equações conhecidas sejam de natureza empírica (Alves, 2009). A equação para a determinação da taxa de erosão superficial (Q_{es}) apresentada por Ariathurai e Partheniades, é expressa por:

$$Q_{es} = \left\{ \begin{array}{ll} M_{es} \left(\frac{\tau - \tau_{cr,es}}{\tau_{cr,es}} \right), & \tau \geq \tau_{cr,es} \\ 0, & \tau < \tau_{cr,es} \end{array} \right\} \quad (2.06)$$

Os parâmetros necessários ao cálculo da expressão 2.06 são a constante da taxa de erosão superficial (M_{es}), a tensão tangencial no fundo (τ) e a tensão tangencial crítica de erosão superficial ($\tau_{cr,es}$). Estes três argumentos são desenvolvidos de seguida.

▪ **Constante da taxa de erosão superficial (M_{es})**

De acordo com Araújo (2004), a constante da taxa de erosão superficial (M_{es}) depende de parâmetros físico-químicos, que determinam as forças inter-partículas características dos sedimentos coesivos. Esta constante toma valores consoante a massa volúmica dos sedimentos, a qual pode variar em profundidade e no tempo (Huang *et al.*, 2006). Hwang e Mehta apresentam uma fórmula:

$$\log_{10} M_{es} = 0,23e^{\left(\frac{0,198}{\rho_m - 1,0023} \right)} \quad (2.07)$$

O valor de massa volúmica molhada do depósito (ρ_m), pode ser estimado laboratorialmente.

- **Tensão tangencial crítica de erosão superficial ($\tau_{cr,es}$)**

Para determinar a tensão tangencial crítica de erosão superficial ($\tau_{cr,es}$) podem-se referir duas formulações. A fórmula 2.08, de Hwang e Mehta:

$$\tau_{cr,es} = a_{es} (\rho_m - \rho_l)^{b_{es}} + c_{es} \quad (2.08)$$

Nesta expressão os valores propostos para as várias parcelas são: $a_{es} = 0,883$, $b_{es} = 0,2$, $c_{es} = 0,05$ e $\rho_l = 1,065 \text{ g/cm}^3$ (de acordo com o indicado por Alves, 2009).

Por outro lado, Nicholson e O'Connor propõem:

$$\tau_{cr,es} = \tau_{rd} + A(\rho_s + \rho_{rd})^B \quad (2.09)$$

Segundo Alves (2009), $\tau_{rd} = 0,08 \text{ N/m}^2$, $A = 0,5 \times 10^{-3} \text{ N/m}^{5/2}/\text{kg}^{3/2}$, $B = 1,5$ e $\rho_{rd} = 80 \text{ kg/m}^3$.

De acordo com Costa e Coelho (2010), Lopes *et al.* em trabalhos desenvolvidos em 2000, apresentam um valor de $0,2 \text{ N/m}^2$ para a tensão tangencial crítica de erosão nos canais do Norte da Ria e por seu lado, em estudos realizados em 2007, Lopes e Dias, admitem igualmente $\tau_{cr,es} = 0,2 \text{ N/m}^2$, não especificando o local da Laguna.

A tensão tangencial no fundo, τ , pode ser obtida de acordo com o descrito no ponto 2.1.1.

2.2. Sedimentos não-coesivos

O transporte sólido total corresponde ao conjunto do material transportado pelo escoamento de um curso hídrico, quer em suspensão, quer por arrastamento. Estes dois modos de transporte são em geral analisados separadamente, no entanto, não é possível definir isoladamente as duas parcelas de transporte, nem considerar que estas são independentes (Português, 2008).

Existem várias formulações para o cálculo do transporte sólido total de sedimentos não-coesivos. Português (2008), apresenta as expressões propostas por Shen e Hung, Eugelund e Hansen, Ackens e White, Karin e Kennedy e Van Rijn. Pelo conhecimento prévio da expressão proposta por Van Rijn, será esta a adoptada para as análises desenvolvidas no âmbito deste trabalho.

2.2.1. Transporte sólido por arrastamento

Van Rijn, em 1984, apresentou a expressão 2.10 para o cálculo do caudal sólido por arrastamento, cuja derivação considerou a altura de saltação das partículas, a sua velocidade e a concentração do material transportado. Com base nas equações do movimento, determinou a altura de saltação e a velocidade das partículas, e recorreu a resultados experimentais para determinar a concentração dos sedimentos na camada de transporte por arrastamento. Esta expressão resulta adequadamente para valores do diâmetro mediano de areias (D_{50}) entre os 0,2 mm e os 2 mm (Português, 2008).

$$q_b = \frac{0,05T^{2,1}}{D_*^{0,3}} [(s-1)g]^{0,5} D_{50}^{1,5} \quad (2.10)$$

A expressão enumerada acima depende de vários parâmetros, os quais por sua vez, para serem calculados, também dependem de inúmeros argumentos. Desta forma, opta-se por referenciar cada parâmetro de cálculo em separado, indicando todas as expressões necessárias à obtenção da estimativa final desta parcela de transporte sólido.

- **Parâmetro adimensional de capacidade de transporte (T)**

De acordo com Cardoso (1998), Van Rijn adoptou para o cálculo da capacidade de transporte a expressão 2.11. Esta expressão depende dos valores das tensões de arrastamento no fundo e respectivo valor crítico, ou na mesma relação, em função dos quadrados das velocidades de atrito no fundo.

$$T = \frac{\tau'_0 - \tau_c}{\tau_c} = \frac{(u'_*)^2 - (u_{*c})^2}{(u_{*c})^2} \quad 0 < T < 25 \quad (2.11)$$

- **Velocidade de atrito junto ao fundo, associada ao escoamento sobre leito plano (u'_*)**

Da mesma forma, Cardoso (1998), apresenta a expressão 2.12 para a estimativa da

velocidade de atrito. Esta depende da velocidade média de escoamento, da aceleração da gravidade (valor constante) e de um parâmetro C' , definido posteriormente.

$$u'_* = \sqrt{g} \times \frac{U}{C'} \quad (2.12)$$

- **Parcela do coeficiente de Chézy associada a k' (C')**

$$C' = 18 \times \log\left(\frac{12R}{k'}\right) \quad (2.13)$$

Em conformidade com Cardoso (1998), na expressão 2.13, o R representa o raio hidráulico e k' a rugosidade do fundo, é estimada como sendo igual ao triplo do D_{90} .

- **Velocidade de atrito junto ao fundo, correspondente ao início do transporte sólido (u_{*c})**

A velocidade de atrito junto ao fundo, correspondente à situação crítica de início do transporte sólido pode ser obtida, segundo Cardoso (1998), pela curva de Shields. Por seu lado, Van Rijn forneceu expressões analíticas para o seu cálculo, tendo em conta o valor crítico do parâmetro de Shields (Y_{cr}).

$$u_{*c} = \sqrt{\frac{Y_{cr} \times (\gamma_s - \gamma_w) \times D_{50}}{\rho_w}} \quad (2.14)$$

- **Pesos volúmicos e Diâmetro mediano de peneiração (D_{50})**

Na expressão 2.14, entram o peso volúmico do grão do material sólido, γ_s , neste caso, das diferentes classes de areias existentes na Ria de Aveiro e o peso volúmico da água, γ_w .

O D_{50} é o diâmetro mediano de peneiração, ou seja, o diâmetro de peneiração tal que 50% em peso é mais fino. É uma característica dos sedimentos obtida principalmente através de ensaios laboratoriais. O mais útil e conveniente método para a análise do tamanho das

partículas é a utilização da curva de distribuição granulométrica. A partir desta curva, é possível retirar os vários diâmetros de peneiração, que correspondem ao diâmetro de peneiração tal que n% em peso é mais fino (Português, 2008).

Na tabela 2.5 encontram-se diferentes gamas de diâmetros de areias, parte delas consideradas neste trabalho.

Tabela 2.5: Classificação das areias.

Classe	Gama de diâmetros
Areia muito fina	0,62 µm a 0,125 mm
Areia fina	0,125 mm a 0,25 mm
Areia média	0,25 mm a 0,50 mm
Areia grosseira	0,50 mm a 1,00 mm
Areia muito grosseira	1,00 mm a 2,00 mm

▪ **Parâmetro de Shields correspondente ao início do movimento (Y_{cr})**

De acordo com Cardoso (1998),

$$\begin{aligned}
 Y_{cr} &= 0,24 \times (D_*)^{-1} && \text{se } D_* \leq 4 \\
 Y_{cr} &= 0,14 \times (D_*)^{-0,64} && \text{se } 4 < D_* \leq 10 \\
 Y_{cr} &= 0,04 \times (D_*)^{-0,1} && \text{se } 10 < D_* \leq 20 \\
 Y_{cr} &= 0,013 \times (D_*)^{0,29} && \text{se } 20 < D_* \leq 150 \\
 Y_{cr} &= 0,055 && \text{se } D_* > 150
 \end{aligned} \tag{2.15}$$

▪ **Parâmetro adimensional que caracteriza o diâmetro do material do fundo (D_*)**

O diâmetro adimensional do material do fundo considera propriedades da água e dos sedimentos:

$$D_* = D_{50} \left[\frac{g \times (s-1)}{v^2} \right]^{1/3} \tag{2.16}$$

- **Densidade do grão das partículas (s)**

Um parâmetro directamente relacionado com os pesos volúmicos é a densidade do grão das partículas de material sólido (s). Esta resulta do quociente entre a massa volúmica das partículas e a massa volúmica da água e varia com a composição mineralógica.

A composição dos sedimentos originados pela erosão hídrica é geralmente de quartzo e feldspato, com densidade usual de cerca de 2,65 (Português, 2008).

- **Viscosidade cinemática da água (ν)**

A viscosidade cinemática da água depende da temperatura, mas pode considerar-se o valor de $1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.

2.2.2. Transporte sólido em suspensão

De forma a prever o caudal sólido em suspensão, em 1984, Van Rijn apresentou uma fórmula baseada na concentração de sedimentos, numa altura de referência (C_a). Esta deve ser avaliada a um nível de referência z_a (Português, 2008).

$$q_s = F_r U h C_a \quad (2.17)$$

Tal como o cálculo do transporte sólido por arrastamento, também a expressão para determinar o transporte sólido em suspensão envolve o prévio conhecimento de vários argumentos, os quais, se definem de seguida, de acordo com Cardoso (1998).

- **Variável auxiliar definida por Van Rijn (F_r)**

$$F_r = \frac{\left(\frac{z_a}{h}\right)^{y'_*} - \left(\frac{z_a}{h}\right)^{1,2}}{\left(1 - \frac{z_a}{h}\right)^{y'_*} \times (1,2 - y'_*)} \quad (2.18)$$

A expressão 2.18, provém de Cardoso (1998).

- **Distância do fundo (z_a), para a qual se supõe conhecida a concentração de referência**

A concentração de referência, C_a , deve ser avaliada à distância z_a , dada por metade da altura Δ , das configurações de fundo ou pela rugosidade equivalente de Nikuradse, $k = k' = 3D_{90}$ (no caso de não se conhecerem essas configurações), com um mínimo de $0,01h$ (Cardoso, 1998).

A expressão 2.19 traduz o exposto.

$$z_a = \frac{\Delta}{2} \text{ ou } z_a = 3 \times D_{90}, \text{ se } z_a \geq 0,01h \quad (2.19)$$

- **Altura das configurações de fundo (Δ)**

Uma vez iniciado o transporte sólido por arrastamento, o escoamento da água sobre um fundo móvel interage com este, modelando-o e dando origem a diferentes configurações do fundo. A natureza das interações entre o fundo e o fluido e as configurações que daí resultam dependem da velocidade, da profundidade do escoamento, das propriedades do fluido e do material granular do fundo (Português, 2008).

De acordo com Português (2008), vem:

$$\begin{aligned} \Delta &= 0 && \text{se } \tau_0 < \tau_c \\ \Delta &= 0,11h \times \left(\frac{D_{50}}{h} \right)^{0,3} \times (1 - \exp(-0,5T)) \times (25 - T) && \text{se } \tau_c < \tau_0 < 26\tau_c \\ \Delta &= 0 && \tau_0 > 26\tau_c \end{aligned} \quad (2.20)$$

- **Tensão crítica de arrastamento (τ_c)**

Em concordância com Português (2008), Van Rijn em 1984, deduziu a expressão 2.21 para

o cálculo da tensão crítica, tendo em conta o valor crítico do parâmetro de Shields (Y_{cr}), os pesos volúmicos dos sedimentos e da água e a dimensão das partículas.

$$\tau_c = Y_{cr} \times (\gamma_s - \gamma_w) \times D_{50} \quad (2.21)$$

▪ **Tensão média de arrastamento no fundo (τ_0)**

A tensão tangencial na direcção do escoamento, aumenta linearmente com o acréscimo da distância à superfície e é máxima junto ao fundo. É aqui designada por tensão de arrastamento τ_0 . Esta tensão relaciona-se com o peso volúmico do fluido (γ), com o raio hidráulico (R), e com o declive da linha de energia (J) que normalmente se considera igual ao declive do fundo (i) para canais pouco inclinados (Português, 2008).

$$\tau_0 = \gamma \times R \times J = \rho \times g \times R \times J \quad (2.22)$$

Quando o valor de tensão de arrastamento supera o valor crítico, há condições para haver transporte sedimentar.

▪ **Número de Rouse corrigido segundo Van Rijn (y'_*)**

O número de Rouse corrigido intervém no cálculo da variável auxiliar F_r .

De acordo com Cardoso (1998), vem:

$$y'_* = y_* + \varphi' = \frac{w_s}{\beta' \times k \times u_*} + \varphi' \quad (2.23)$$

Na expressão, k corresponde à rugosidade absoluta equivalente de Nikuradse e toma normalmente o valor de 0,4.

▪ **Velocidade de queda das partículas em suspensão (w_s)**

Van Rijn, apresenta a expressão 2.24 para o cálculo da velocidade de sedimentação, que depende fundamentalmente do diâmetro representativo do material transportado em suspensão (D_s).

$$w_s = 10 \frac{v}{D_s} \left\{ \left[1 + \frac{0,01 \times (s-1) \times g \times D_s^3}{v^2} \right]^{0,5} - 1 \right\} \quad 0,1 \text{ mm} < D_s < 1,0 \text{ mm} \quad (2.24)$$

$$w_s = 1,1 [(s-1) \times g \times D_s]^{0,5} \quad D_s \geq 1,0 \text{ mm}$$

▪ **Diâmetro representativo do material transportado em suspensão (D_s)**

$$D_s = D_{50} [1 + 0,011 \times (\sigma_D - 1) \times (T - 25)] \quad (2.25)$$

Na equação 2.25, o coeficiente de graduação (σ_D) é o indicador da aproximação da curva granulométrica a uma distribuição log-normal, ou seja, representa o desvio-padrão da curva de distribuição granulométrica que caracteriza a mistura de sedimentos (Cardoso, 1998). O valor deste parâmetro depende dos diâmetros de peneiração, mas normalmente adopta-se um valor entre 2,0 e 2,5.

▪ **Razão entre o coeficiente de difusão de sedimentos e a viscosidade aparente (β')**

$$\beta' = 1 + 2 \left(\frac{w_s}{u_*} \right)^2 \quad 0,1 < \frac{w_s}{u_*} < 1,0 \quad (2.26)$$

▪ **Correcção introduzida por Van Rijn no número de Rouse (φ')**

De acordo com Cardoso (1998), a correcção do número de Rouse é dada por:

$$\varphi' = 2,5 \left(\frac{w_s}{u_*} \right)^{0,8} \times \left(\frac{C_a}{0,65} \right)^{0,4} \quad 0,01 \leq \frac{w_s}{u_*} \leq 1,0 \quad (2.27)$$

- **Concentração de referência observada à distância z_a do fundo (C_a)**

Por fim, a concentração de referência, estimada a uma distância z_a do fundo:

$$C_a = \frac{0,015 \times D_{50} \times T^{3/2}}{z_a \times D_*^{0,3}} \quad (2.28)$$

2.2.3. Transporte sólido total

Em suma, Van Rijn propôs a expressão 2.29 para o cálculo do transporte sólido total, baseada na soma das parcelas correspondentes ao transporte por arrastamento e em suspensão (Coelho *et al.*, 2007).

$$q_t = q_s + q_b \quad (2.29)$$

Capítulo 3

3. MODELO NUMÉRICO

Para caracterizar o comportamento hidrodinâmico da Ria de Aveiro foi possível aceder a resultados de modelação numérica do modelo ELCIRC.

O ELCIRC é um modelo desenhado para a simulação eficaz a três dimensões, das condições hidrodinâmicas de uma Laguna. Este modelo é capaz de determinar a elevação da superfície livre, a velocidade de escoamento, a salinidade e a temperatura, utilizando um conjunto de seis equações hidrodinâmicas, baseado em Boussinesq e em aproximações hidrostáticas, que representam a conservação de massa, a conservação do momento, e a conservação do sal e calor. O domínio horizontal é discretizado com uma malha triangular para a flexibilidade, e coordenadas z são usadas na vertical.

No presente trabalho foi utilizado o módulo hidrodinâmico do modelo e para o modelo da Ria de Aveiro é utilizada uma única camada vertical. Devido à pouca profundidade e menor quantidade de água doce deste sistema, a circulação pode adequadamente ser simulada com uma profundidade média de modelo (Picado, 2008).

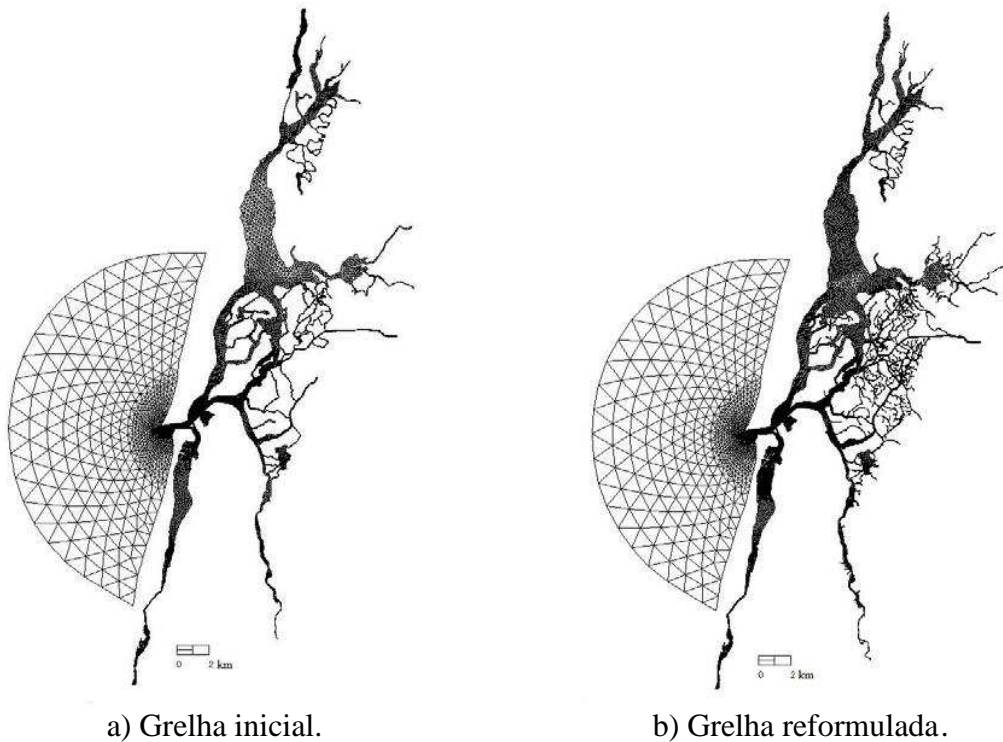


Figura 3.1: Grelha horizontal da Ria de Aveiro.

De acordo com Picado (2008), a Ria está representada no modelo por uma grelha horizontal, com 29380 elementos e 18851 nós, que inclui uma área de cerca de 206 km² (Figura 3.1a). Na verdade, essa grelha horizontal revela-se insuficiente, pois muitos canais não estão representados. Por essa razão, Picado (2008), afirma que houve a necessidade de completar a rede existente, adicionando e refinando diversos canais, principalmente na zona central da Laguna. A grelha final inclui uma área de cerca de 210 km² (Figura 3.1b), possui 94352 elementos e 71996 nós.

A calibração realizada por Picado (2008), ajusta o coeficiente de atrito de fundo, através da comparação entre séries temporais de elevação da superfície livre da água medidas e resultantes do modelo, em catorze estações distribuídas ao longo da laguna. Nesse trabalho também foi efectuada a análise harmónica comparativa entre estes dados e os resultantes do modelo, de modo a avaliar a sua precisão. Os resultados mostraram que, apesar de existirem diferenças entre o modelo e os dados, foi conseguida uma boa calibração.

Numa fase posterior foi utilizada uma nova grelha, que representa a Ria inundada na zona das marinhas de sal.

Do modelo numérico ELCIRC obtêm-se as velocidades de escoamento e as alturas das colunas de água nas estações de estudo definidas de seguida.

3.1. Localização das estações

A figura 3.2 representa as 30 estações escolhidas ao longo de toda a Laguna. As estações foram escolhidas nestas secções, de forma a utilizar valores de parâmetros necessários ao cálculo publicados para estes locais e no final realizar a comparação dos resultados estimados para as taxas de transporte. Dezoito das estações são iguais às analisadas no Relatório de Progressão da JAPA em 1989, outras quatro são escolhidas de acordo com o trabalho desenvolvido por Abrantes (2005), e os restantes oito pontos foram escolhidos ao acaso, concentrados na zona das marinhas de sal, para testar a influência do seu alagamento em toda a Laguna.

Nestes trinta locais estudaram-se os mecanismos de deposição, erosão e transporte sólido total e foram analisados os resultados da altura da coluna de água e das componentes da velocidade de escoamento ao longo de 30 dias (720 horas), caracterizando a evolução em diferentes ciclos de maré, obtidos pela modelação numérica.

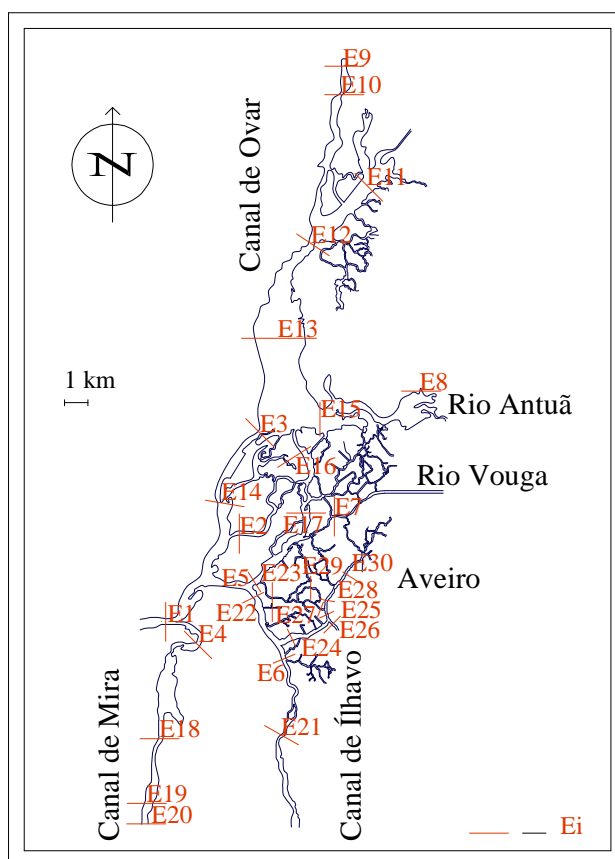


Figura 3.2: Estações de estudo.

3.2. Avaliação de cenários de maré

O modelo ELCIRC fornece duas componentes de velocidade de escoamento, no sentido do referencial generalizado x e y . No entanto os dados foram tratados de forma a considerar-se em cada secção apenas a velocidade segundo a direcção do escoamento.

A análise gráfica (figura 3.3) das velocidades de escoamento nas 720 horas do mês, para as 30 estações, proporcionou a escolha das situações de maré mais relevantes, em intervalos de 13 horas, coincidentes para todas as estações. Considera-se que a Maré Morta mais significativa se situa entre as 233 e as 246 horas, que uma Maré Média representativa vai das 108 às 121 horas e a Maré Viva mais significativa é entre as 413 e as 426 horas.

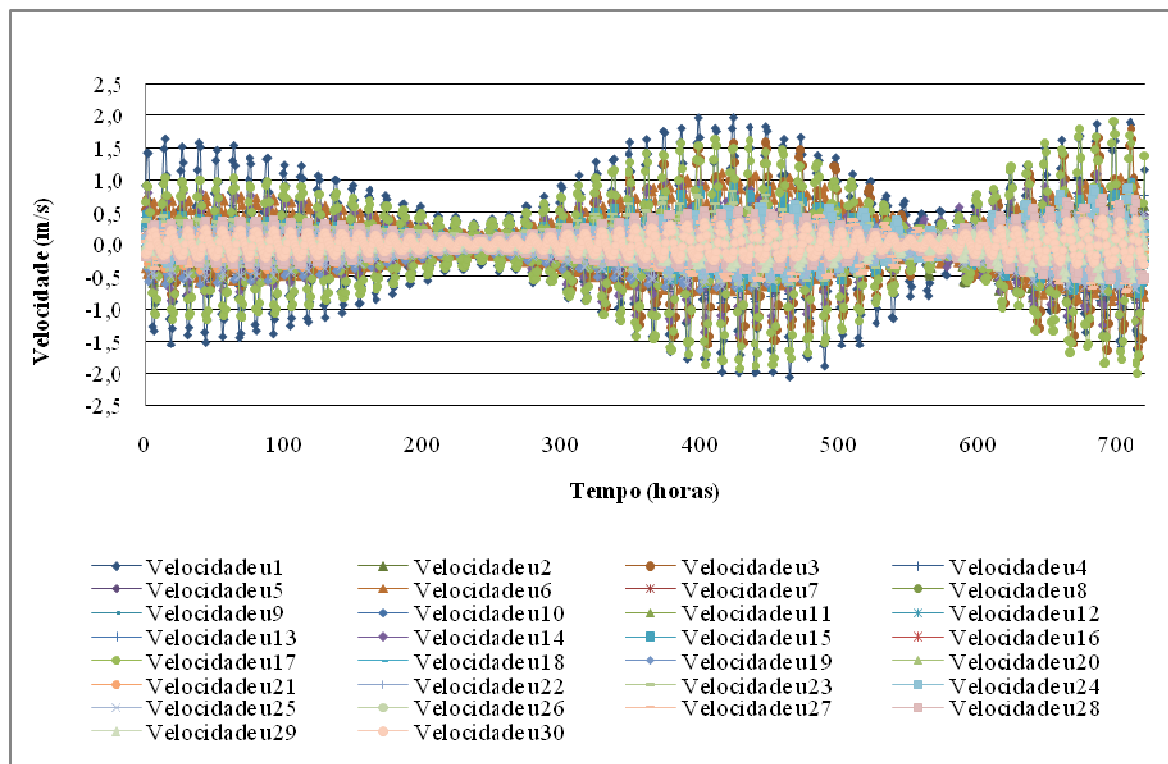


Figura 3.3: Gráfico de sobreposição de velocidades de escoamento.

3.3. Altura média do escoamento (h)

As alturas médias do escoamento resultam do modelo numérico ELCIRC, para 720 horas, ou seja para o intervalo de um mês. As alturas de escoamento variam muito de estação para estação, dependendo da largura e da profundidade da secção em causa, e variam também em cada instante de maré.

O máximo valor de altura de escoamento observa-se na estação E1, ou seja, na Barra de Aveiro, a zona mais profunda de toda a Laguna (21,58 metros). Por oposição, o valor mínimo obtido é de 0 metros, isto é, os canais encontram-se a seco, não havendo escoamento. Este facto ocorre, em cerca de 37 % das estações em estudo. A altura média ocorrida nas 720 horas de análise e na totalidade das estações é de 3,09 metros (Anexo B).

Nas figuras seguintes representam-se o valor máximo e mínimo da altura de escoamento, que são observados em período de Maré Viva e o valor médio da altura de escoamento resultante da Maré Média para as 30 estações em análise.

3.4. Velocidade média do escoamento (U)

Do mesmo modo que a altura média de escoamento, a velocidade média do escoamento resulta da aplicação do modelo ELCIRC em todas as secções das estações em estudo, para as mesmas 720 horas. A velocidade máxima obtida é de 2,06 m/s na Barra, em situação de vazante. Em estofa de maré e em situação de canal a seco, as velocidades podem aproximar-se de valores nulos. A velocidade máxima ocorre em enchente em 43 % das estações e por oposição, ocorre na vazante em 57 % das estações. No que concerne à velocidade de escoamento média, nas 30 estações, no ciclo completo, o valor encontrado é aproximadamente 0,19 m/s (Anexo B).

As velocidades de escoamento apresentadas nos esquemas referem-se a três situações. O valor máximo de velocidade de escoamento para a Maré Viva, o mínimo da velocidade de escoamento para a Maré Morta e o valor médio em Maré Média. Estes valores são representados para cada estação do estudo e naturalmente a velocidade média de escoamento aumenta desde a Maré Morta até à Maré Viva.

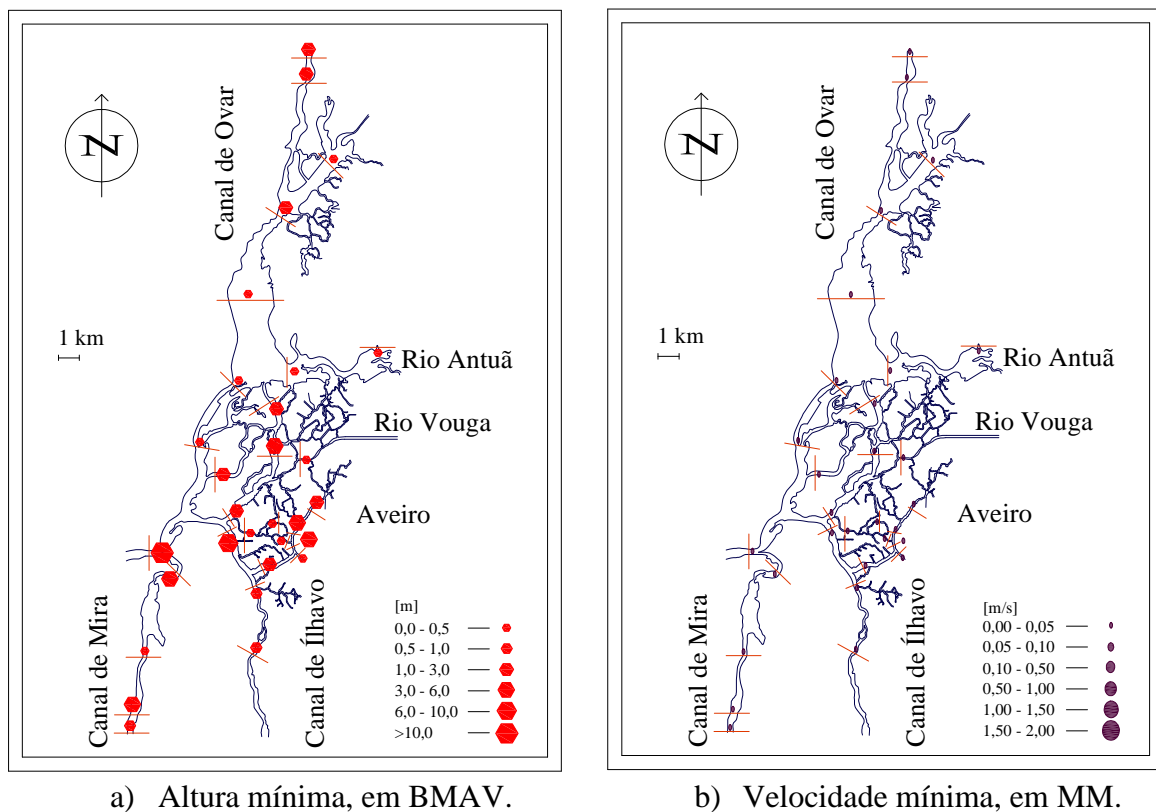
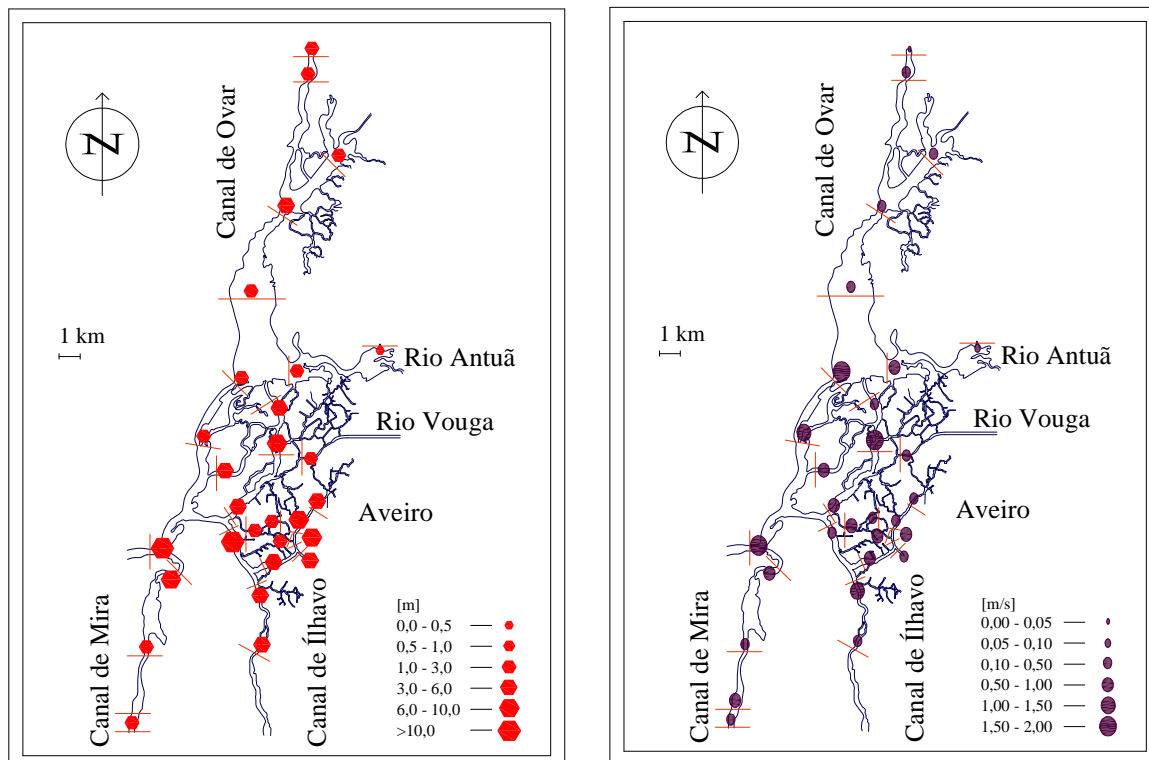


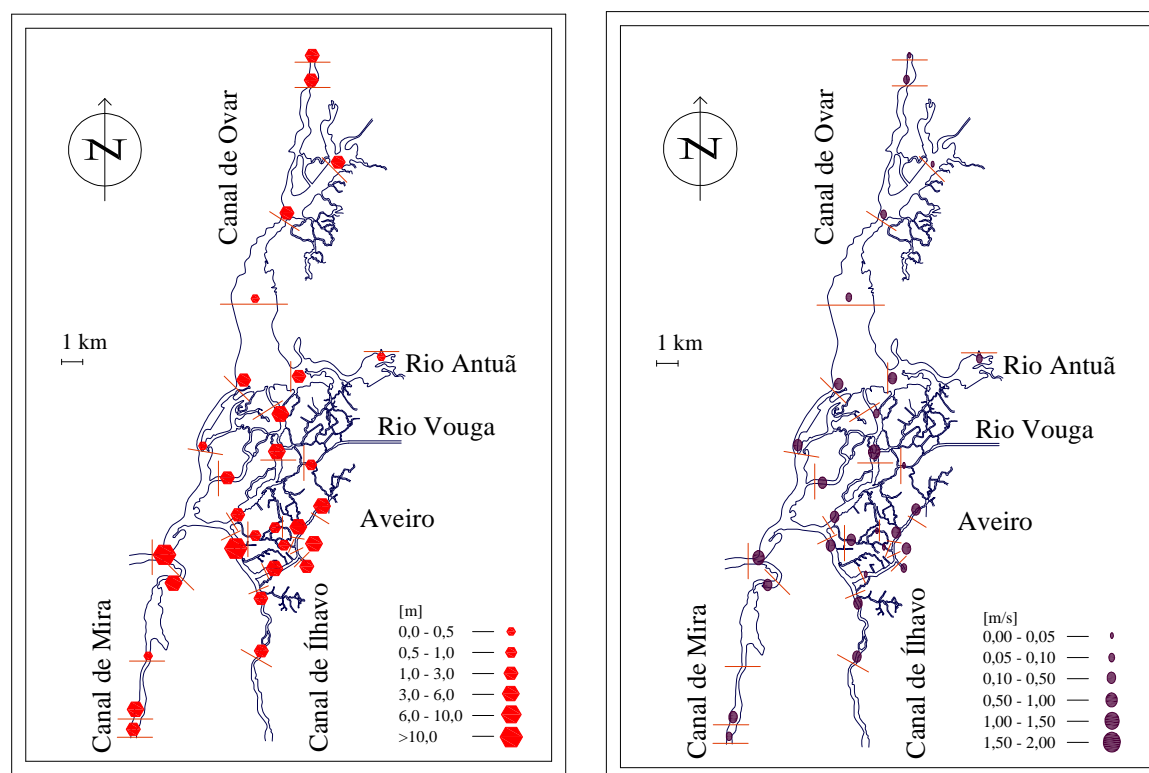
Figura 3.4: Valores mínimos de altura e velocidade do escoamento.



a) Altura máxima, em PMAV.

b) Velocidade máxima, em MV.

Figura 3.5: Valores máximos de altura e velocidade do escoamento.



a) Altura média, em MMed.

b) Velocidade média, em MMed.

Figura 3.6: Valores médios de altura e velocidade do escoamento.

3.5. Sentido do escoamento

Definindo o sentido do escoamento conseguem-se distinguir a quantidade de sedimentos transportados, em enchente e vazante. Para tal, considera-se positiva a velocidade u , em enchente, na estação E1, de acordo com a figura 3.8.

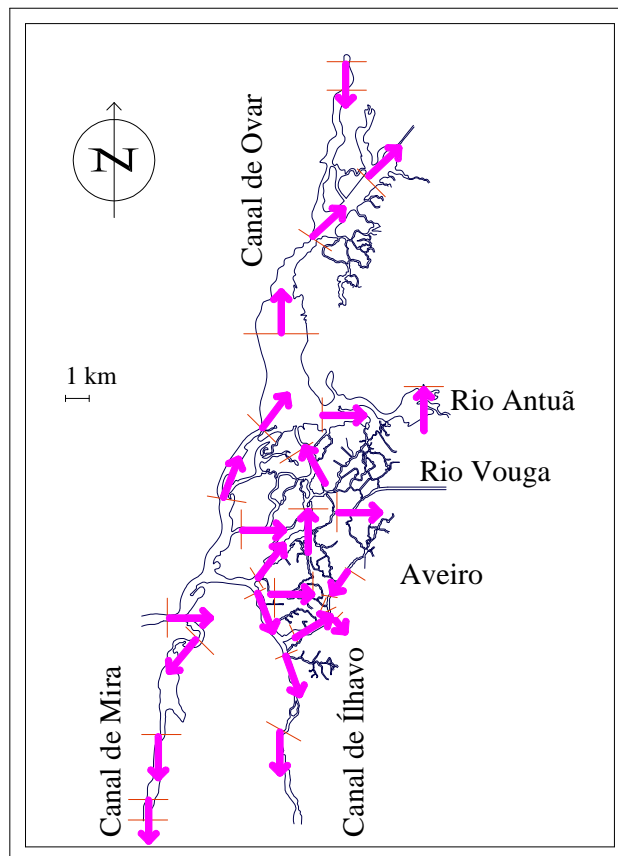


Figura 3.7: Sentido do escoamento em período de enchente de maré.

CAPÍTULO 4

4. CARACTERÍSTICAS DA RIA DE AVEIRO

4.1. Propriedades dos sedimentos

4.1.1. Pesos volúmicos

De acordo com Gomes (1992), o intervalo de valores do peso específico das partículas, do peso volúmico do solo, do peso volúmico do solo seco e do índice de vazios apresentados na tabela 4.1, provêm de ensaios realizados sobre solo presente na área das marinhas da Ria da Aveiro.

Tabela 4.1: Parâmetros físicos “in situ” dos solos aluvio-lodosos da região de Aveiro (Gomes, 1992).

Tipo de solo	Peso específico das partículas, γ_s (kN/m ³)	Peso volúmico do solo, γ (kN/m ³)	Peso volúmico do solo seco, γ_d (kN/m ³)	Índice de vazios, e
Lodos “sensu strictu”	23,4 a 26,6	12,0 a 17,3	6,3 a 11,6	1,03 a 2,18
Lodos com areia	24,0 a 26,8	15,8 a 18,5	10,0 a 14,2	0,91 a 1,88
Lodos arenosos	24,0 a 26,8	17,5 a 20,3	12,4 a 15,9	0,65 a 1,78
Areias lodosas	25,0 a 27,0	16,5 a 20,5	12,8 a 17,2	0,45 a 0,80

O peso volúmico das partículas (γ_s) utilizado para o cálculo do transporte sólido total pode variar entre 25 a 27 kN/m³ (tabela 4.1) consoante se considerou a areia nessa estação mais fina ou mais grosseira respectivamente. Na zona das marinhas, ou seja, das estações E22 à E30, o valor usado foi 18 kN/m³ (Anexo A).

4.1.2. Litologia da Ria de Aveiro

A evolução morfológica da Ria de Aveiro deve-se à movimentação dos sedimentos recentes que formam o litoral de Aveiro, entre Espinho e o cabo Mondego.

Nos sedimentos comuns dos canais da Ria, as fracções granulométricas mais abundantes são a areia fina e o silte, frequentemente com alguma argila. As areias predominam ao longo do cordão litoral e no leito dos canais próximos da barra. O sedimento mais fino, com comportamento coesivo, forma extensos bancos de maré em grande parte colonizados

por vegetação halófitas (Marinheiro, 2008).

Segundo Marinheiro (2008), foi realizado um trabalho por Pelicano *et al.* em 2000, onde afirmavam que as amostras de sedimentos dos fundos dos canais da Laguna apresentam geralmente uma mistura de materiais arenosos e lodosos, sendo os canais a Norte predominantemente constituídos por sedimentos coesivos e os canais a Sul por sedimentos não-coesivos.

Segundo Lopes *et al.* (2006), Grim refere que os sedimentos coesivos consistem basicamente em partículas argilosas (Caulinite, Montemorlonite, Illite, Clorite, Vermiculite, e Haloisite), em componentes minerais não argilosos e em material orgânico. Os minerais da argila são constituídos por partículas muito finas, geralmente menores que 2 μm .

De acordo com Ferreira Gomes e Ladeira (1989), a granulometria do canal de Mira e dos Rios Vouga e Bouco, pode ser definida de acordo com a percentagem de sedimentos retidos no peneiro número 200. As conclusões do processo de peneiração estão explícitas na tabela 4.2.

Tabela 4.2: Percentagem de material de estudo retido no peneiro n° 200.

Tipo de solo	Percentagem retida no peneiro n° 200 (%)
Lodos “sensu strictu”	≤ 14
Lodos com areia	15 a 29
Lodos arenosos	30 a 50
Areias lodosas	50 a 60

No canal de Mira, ou seja, estações E4, E18 à E20, a maior percentagem de sedimentos são areias lodosas.

Nesta fase pretende-se caracterizar granulometricamente todas as estações em estudo. Na figura 4.1 apresenta-se a litologia de grande parte da Laguna, adaptada de Abrantes (2005). Pretende-se distinguir as estações consoante o tipo de sedimentos predominantes, em duas classes: sedimentos não-coesivos (NC) e sedimentos coesivos (C). Apresentam-se na tabela 4.3 as conclusões.

Os canais do Norte são fundamentalmente compostos por argilas arenosas, havendo também algumas estações na zona das marinhas que apresentam esta granulometria. A zona central da Laguna alterna entre as três gamas de areia (fina, média e fina, e média) e a zona da embocadura, embora aqui não representada, apresenta maioritariamente areia

grosseira. Os canais do Sul (canal de Ílhavo) são essencialmente constituídos por areia média e fina. No canal de Mira, considera-se o sedimento igual ao predominante na Barra. As estações E22 à E30 são consideradas nos dois tipos de análise, porque não há certezas quanto ao tipo de sedimento que predomina na zona das marinhas de sal. O sedimento varia entre argila arenosa e areia média a fina.

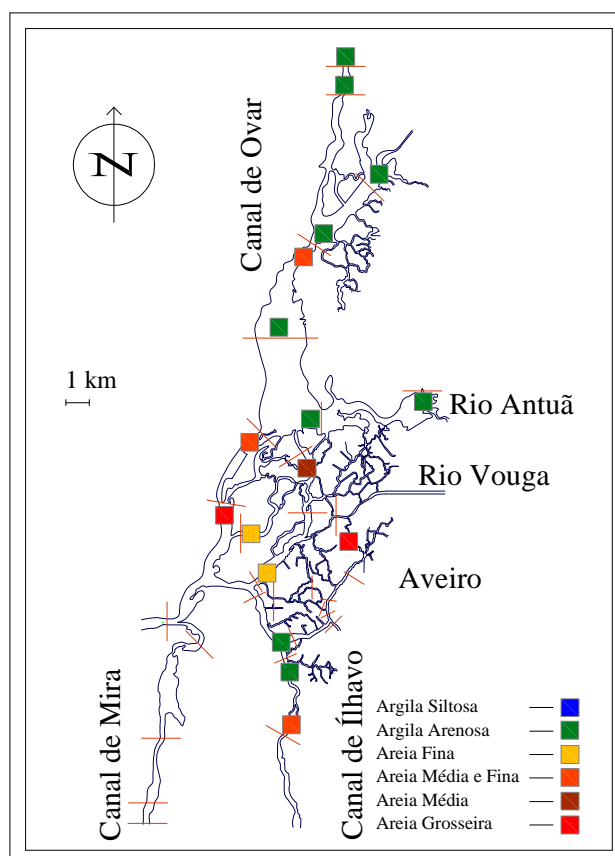


Figura 4.1: Litologia (adaptada de Abrantes, 2005).

Na tabela 4.3 apresentam-se também as larguras de cada secção (B) em estudo e a percentagem de tempo em que o canal se encontra a seco (T), isto é, o modelo ELCIRC gera alturas de escoamento nulas (por defeito, valores negativos no modelo correspondem a não haver escoamento) o que permite calcular a porção de tempo em que cada estação está sem água.

A estação E13 é o ponto da Laguna em estudo com maior secção, 2051 metros, enquanto a secção da estação E29 é a mais estreita com 11 metros. Cerca de metade das estações têm

secções com largura entre os 200 e os 500 metros e nove das 30 estações têm larguras inferiores a 100 metros. A largura média das secções ronda os 380 metros.

Tabela 4.3: Características das estações.

Estação	Tipo de sedimento	B (m)	T (%)
E1	NC	324	0,0
E2	NC	208	0,0
E3	NC	510	2,4
E4	NC	300	0,0
E5	NC	507	0,0
E6	C	166	0,0
E7	NC	12	2,1
E8	C	201	80,7
E9	C	215	0,0
E10	C	295	0,0
E11	C	713	0,8
E12	C	265	0,0
E13	C	2051	32,0
E14	NC	856	25,9
E15	C	1116	1,7
E16	NC	641	0,0
E17	NC	450	0,0
E18	NC	997	45,6
E19	NC	92	0,0
E20	NC	221	0,0
E21	NC	79	0,0
E22	NC/C	341	0,0
E23	NC/C	89	6,4
E24	NC/C	396	0,0
E25	NC/C	101	0,0
E26	NC/C	26	0,0
E27	NC/C	15	10,7
E28	NC/C	86	0,0
E29	NC/C	11	18,9
E30	NC/C	82	0,0

Grande parte das estações nunca está a seco, ou apresentam uma parcela muito baixa de “canal a seco” no total das 720 horas de estudo. São de destacar a estação E8, que apresenta uma elevada percentagem de tempo sem escoamento, porque é uma estação que se encontra numa extremidade da Laguna, e o escoamento pode eventualmente não ser representado no modelo e as estações E13, E14 e E18, que embora apresentem uma largura de canal considerável, têm também uma percentagem significativa de tempo em que não se representa o escoamento, podendo esta situação ser justificada pelo ponto escolhido na

secção ser junto à margem (discretização da malha de pontos no modelo), não permitindo a representação de valores no modelo ELCIRC.

4.1.3. Diâmetro mediano de peneiração (D_{50})

Na tabela 4.4 indicam-se os intervalos de diâmetros e o respectivo valor médio, considerados para cada tipo de areia predominante nas estações em estudo. Para as estações da zona das marinhas, adoptou-se um diâmetro mediano igual ao das areias finas, pois nessa região a litologia aponta para sedimentos do tipo argilas arenosas. Os valores desta tabela foram adaptados de Português (2008).

Tabela 4.4: Diâmetros limites em cada classe de areias (mm).

Tipo de sedimento	Diâmetro mínimo	Diâmetro máximo	D_{50} adoptado
Areia fina	0,125	0,250	0,188
Areia média	0,250	0,500	0,375
Areia grosseira	0,500	1,000	0,750

Por simplificação o valor de D_{90} , utilizado nos cálculos do transporte sólido total, foi considerado igual ao dobro do diâmetro mediano.

4.1.4. Concentração de matéria particulada em suspensão (C_s)

Os valores utilizados nos cálculos são provenientes de uma amostragem da Ria de Aveiro realizada pelo Departamento de Planeamento, Informação e Comunicação – Divisão de monitorização e laboratório do Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e Desenvolvimento Regional em 2009, para quatro pontos (E6, E12, E15 e E25). Do intervalo de valores proposto por Abrantes em 2005, segundo Costa e Coelho (2010), foram classificadas mais cinco pontos (E8, E9, E10, E11, E13) e nas restantes oito estações localizadas na zona das marinhas e nas zonas adjacentes (E22-E24, E26-E30), o valor utilizado foi o obtido nos trabalhos experimentais realizados junto ao fundo, no âmbito do projecto Murano.

Embora a concentração de matéria particulada em suspensão varie ao longo dos ciclos de maré, e o seu valor à superfície seja diferente do valor junto ao fundo, neste trabalho, por uma questão de simplificação e inexistência de dados diferenciados consoante o período de

maré para todas as estações, adoptou-se um valor constante para cada ponto em análise. Foram sempre utilizados os valores máximos dos intervalos de valores obtidos, de forma a aproximar os valores escolhidos, entre estações. No global das estações de estudo, o máximo valor de concentração de matéria particulada em suspensão é de 66,1 mg/l e o mínimo é de 24 mg/l. O máximo ocorre na zona das marinhas e o mínimo nas estações do Norte.

4.1.5. Velocidade de queda (w_s)

A velocidade de queda foi estimada através da expressão 2.02, unicamente nas estações para as quais se realiza a quantificação das taxas de deposição e de erosão, utilizando os parâmetros K e m propostos por Krone. A concentração de matéria particulada toma os valores referidos acima e descritos na tabela 4.5. A máxima velocidade de queda obtida é de $3,16 \times 10^{-5}$ m/s, um valor muito inferior ao referenciado por Costa e Coelho (2010).

4.1.6. Tensão tangencial crítica de deposição ($\tau_{d,total}$)

A tensão tangencial crítica de deposição varia entre dois valores para todas as estações. O valor de $0,06 \text{ N/m}^2$ adoptado por Krone, para valores de concentração de sedimentos inferiores a $0,3 \text{ g/l}$ e o valor de $0,1 \text{ N/m}^2$, para canais do Norte, referenciado por Costa e Coelho (2010), segundo o trabalho desenvolvido por Lopes *et al.* em 2000 (tabela 4.5).

4.1.7. Tensão tangencial crítica de erosão superficial ($\tau_{cr,es}$)

A tensão tangencial crítica de erosão superficial foi calculada de acordo com a expressão 2.08, considerando a massa volúmica molhada do depósito igual a 1800 kg/m^3 , para todas as estações com predominância de sedimentos não-coesivos.

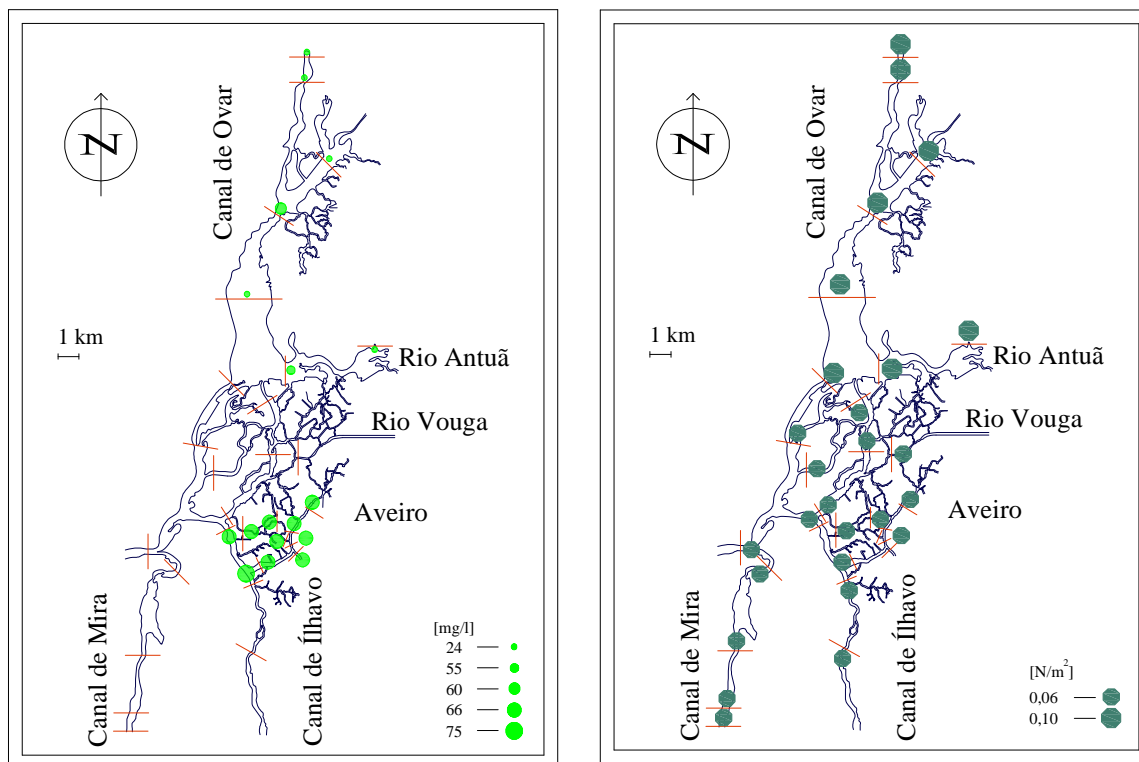
A tabela 4.5 resume o resultado de todas as grandezas descritas e os esquemas (figura 4.2) mostram visualmente a distribuição dos valores mais relevantes.

Tabela 4.5: Propriedades dos sedimentos para estimativa das taxas de transporte.

Estação	γ_s (N/m ³)	D_{50} (mm)	C_s (g/l)	w_s (m/s)	$\tau_{d,total}$ (N/m ²)	$\tau_{cr,es}$ (N/m ²)
E1	27	0,750				
E2	25	0,188				
E3	26	0,375				
E4	27	0,750				
E5	25	0,188				
E6			0,075	3,2e-5	0,06	0,88
E7	27	0,750				
E8			0,024	6,9e-6	0,10	0,88
E9			0,024	6,9e-6	0,10	0,88
E10			0,024	6,9e-6	0,10	0,88
E11			0,024	6,9e-6	0,10	0,88
E12			0,060	2,4e-5	0,10	0,88
E13			0,024	6,9e-6	0,10	0,88
E14	27	0,750				
E15			0,055	2,1e-5	0,10	0,88
E16	27	0,375				
E17	27	0,375				
E18	27	0,375				
E19	27	0,375				
E20	27	0,375				
E21	26	0,375				
E22	18	0,188	0,066	2,7e-5	0,06	0,88
E23	18	0,188	0,066	6,9e-6	0,06	0,88
E24	18	0,188	0,066	2,7e-5	0,06	0,88
E25	18	0,188	0,066	1,8e-5	0,06	0,88
E26	18	0,188	0,066	2,7e-5	0,06	0,88
E27	18	0,188	0,066	2,7e-5	0,06	0,88
E28	18	0,188	0,066	2,7e-5	0,06	0,88
E29	18	0,188	0,066	2,7e-5	0,06	0,88
E30	18	0,188	0,066	2,7e-5	0,06	0,88

Para a concentração de matéria particulada apresenta-se apenas um esquema, pois considerou-se que este parâmetro não varia consoante o ciclo de maré. Os valores representados nos esquemas são provenientes das fontes referenciadas no ponto 4.1.4.

O esquema da tensão crítica de deposição apresenta valores que variam apenas entre 0,06 N/m² e 0,1 N/m². Os canais do Norte têm todos valor 0,1 N/m², segundo um trabalho de Lopes *et al.* em 2000 citado por Costa e Coelho (2010). Para as restantes estações assume-se o valor de 0,06 N/m² de acordo com Krone (Alves, 2009).



a) Concentração de matéria particulada.

b) Tensão crítica de deposição total.

Figura 4.2: Concentração de matéria particulada e tensão crítica de deposição.

4.2. Propriedades do escoamento

As propriedades do escoamento necessárias ao cálculo das taxas de deposição e de erosão superficial, bem como o transporte sólido total são principalmente a altura de escoamento (h), a velocidade média de escoamento (U) (capítulo 3), e o coeficiente de rugosidade de Manning (n).

Os parâmetros acima mencionados são considerados no cálculo da velocidade de atrito junto ao fundo (u_*), que por sua vez é utilizada directamente para obter o valor da tensão tangencial no fundo (τ).

Outro parâmetro também considerado como fazendo parte das propriedades do escoamento é o raio hidráulico (R).

4.2.1. Coeficiente de rugosidade de Manning (n)

O coeficiente de rugosidade de Manning é encontrado em função da altura, com a tabela 2.4 do capítulo 2. Ao longo das 720 horas de estudo a altura de escoamento varia e consequentemente o valor da rugosidade também.

4.2.2. Velocidade de atrito junto ao fundo (u_*)

A velocidade de atrito junto ao fundo é calculada pela expressão 2.05, de acordo com Trento (2005).

4.2.3. Tensão tangencial no fundo (τ)

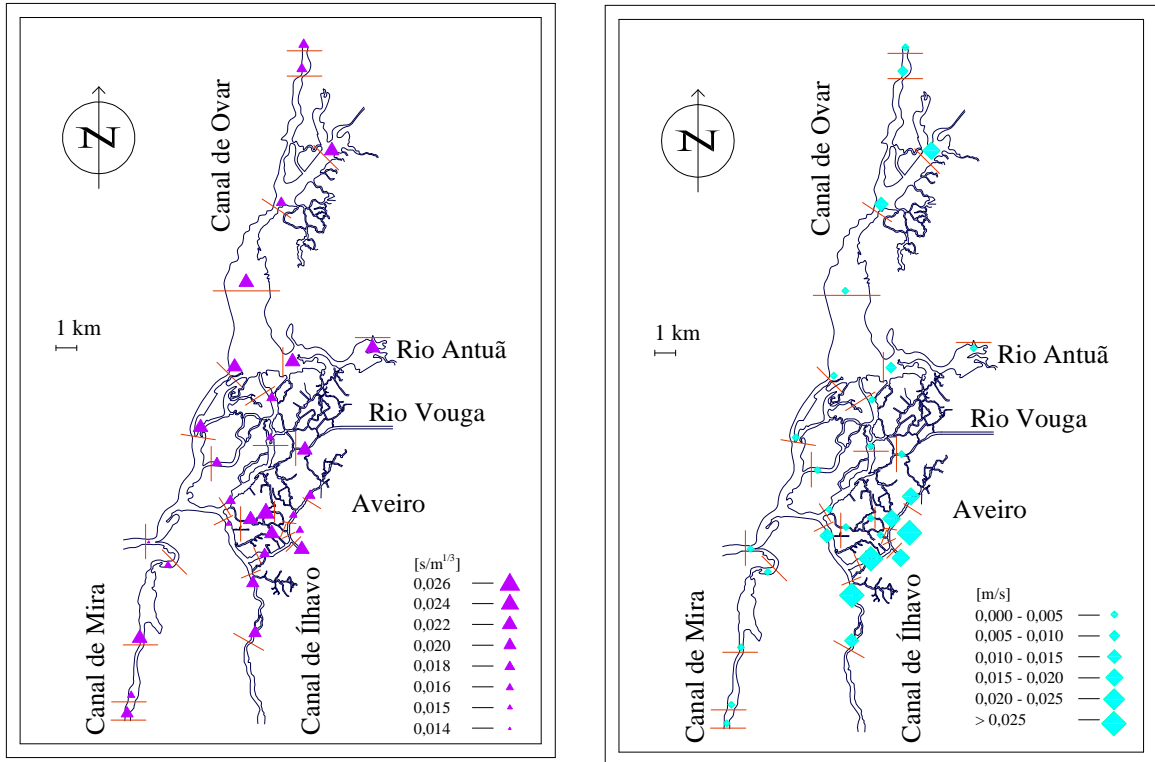
Por sua vez a tensão tangencial junto ao fundo é encontrada através da expressão 2.04, considerando a velocidade de atrito junto ao fundo descrita acima e a massa volúmica da água igual a 1000 kg/m^3 .

4.2.4. Raio hidráulico (R)

Por simplificação e para o cálculo do raio hidráulico considerou-se a secção trapezoidal para as diversas estações, com inclinação dos taludes das margens de 30° . A largura da secção corresponde à largura de rasto, ou seja, à largura junto ao fundo. Quando a largura da secção é reduzida, consequentemente o valor do raio hidráulico resulta pequeno.

Os esquemas apresentados nas figuras 4.3 a 4.5 representam os valores dos parâmetros necessários ao cálculo da taxa de deposição e de erosão que possam ser relevantes no estudo das condições de escoamento nas 30 estações consideradas.

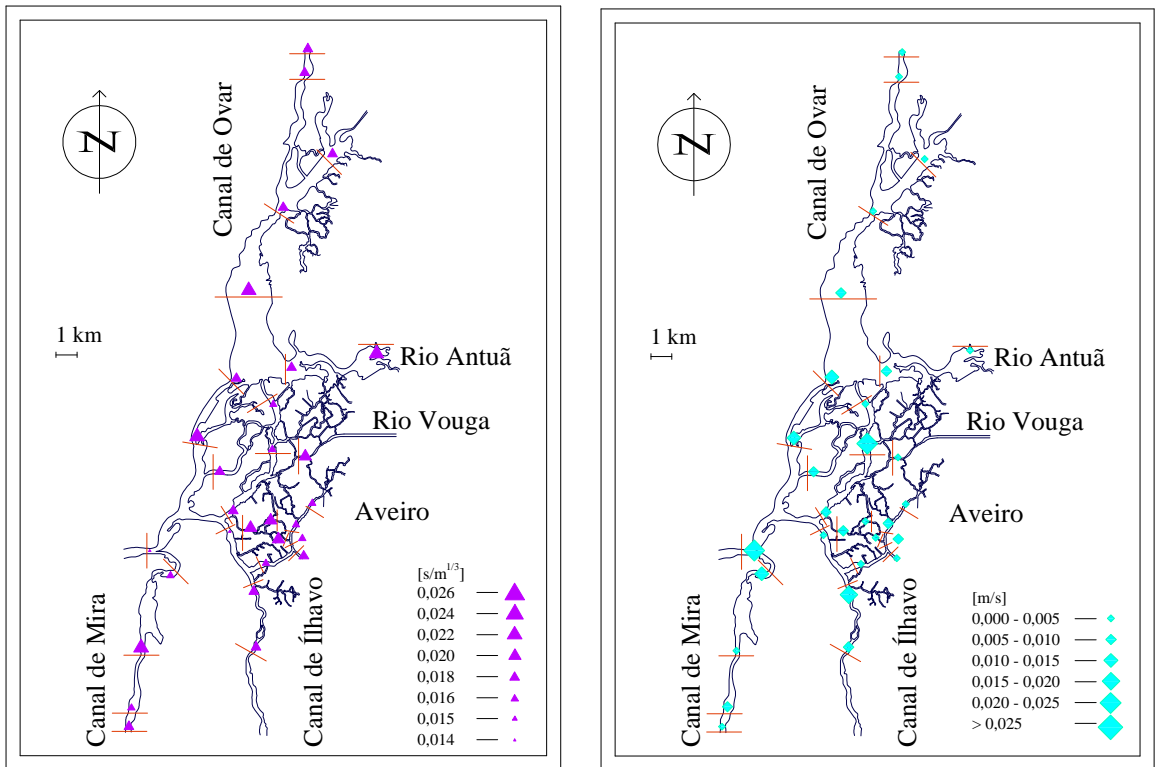
A resistência ao escoamento traduzida pelo coeficiente de rugosidade de Manning foi obtida através da tabela 2.4, em função dos valores esquematizados no capítulo 3, da altura de escoamento. A velocidade de atrito junto ao fundo foi calculada através da expressão 2.05, utilizando igualmente os valores representados, da velocidade de escoamento e da altura de escoamento.



a) Rugosidade mínima de escoamento.

b) Velocidade mínima de atrito no fundo.

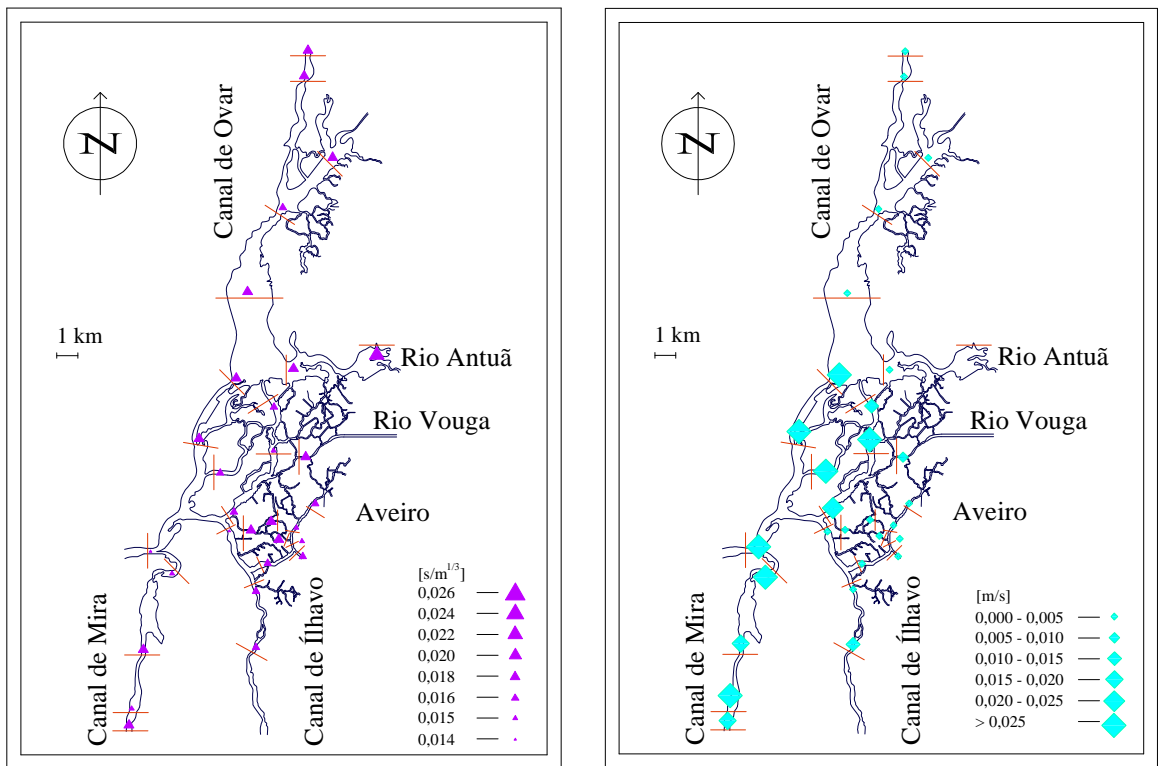
Figura 4.3: Maré Morta e Viva.



a) Rugosidade média de escoamento.

b) Velocidade média de atrito no fundo.

Figura 4.4: Maré Média.



a) Rugosidade máxima de escoamento.

b) Velocidade máxima de atrito no fundo.

Figura 4.5: Maré Viva.

CAPÍTULO 5

5. ANÁLISE DE RESULTADOS

5.1. Comportamento de sedimentos coesivos

5.1.1. Erosão e deposição ao longo dos ciclos de maré

Nesta fase pretende-se comentar os gráficos do anexo C obtidos para cada estação em estudo. Os gráficos são representativos dos cálculos efectuados para os mecanismos de erosão e deposição de sedimentos coesivos. Desta forma, para estações com sedimentos maioritariamente coesivos, representam-se as taxas de deposição e de erosão em cada uma das treze horas para a Maré Morta, Maré Média e Maré Viva, e ainda a altura de escoamento, e a velocidade de escoamento ao longo destas marés.

Numa análise geral, em praticamente todas as estações com predominância de sedimentos coesivos, não existe erosão. No entanto a estação E6 apresenta em Maré Média um pico de erosão em situação de vazante e em Maré Viva este pico de erosão ganha significado, também em situação de vazante. Isto deve-se ao facto, de nestes períodos, a velocidade de escoamento ser significativamente mais alta. Na estação E23 apenas em Maré Viva existe erosão. Esta regista-se no início de enchente e fim de vazante, somente quando a velocidade do escoamento é um pouco superior à média das 13 horas do ciclo. Este facto resulta numa tensão tangencial junto no fundo superior à tensão crítica de erosão superficial, o que gera naturalmente uma taxa de erosão diferente de zero.

A taxa de deposição apresenta-se praticamente constante e com valores baixos (entre 0 e 6 mg/m²) ao longo das 13 horas de cada ciclo de maré analisadas, para todas as estações em estudo. Também é relevante na maioria dos casos, picos máximos da taxa de deposição em estufa de maré, porque nesta fase a altura de escoamento estabiliza e a velocidade de escoamento é nula, ou aproximadamente nula. A deposição atinge normalmente valores superiores em Maré Morta porque as velocidades são mais baixas, logo há maior probabilidade dos sedimentos se depositarem. Os valores nulos de taxa de deposição, quando existem, são em períodos de enchente ou vazante e mais recorrentes em Marés Vivas.

Na estação E27 e E29 existem picos de deposição em Maré Viva em início de vazante e

início de enchente, o que é anormal. No entanto, quando se observam os valores de velocidade correspondentes a estes picos na taxa de deposição, estes são praticamente nulos, correspondendo portanto a uma maior possibilidade de ocorrer sedimentação.

A estação E8 apresenta a velocidade praticamente constante ao longo das 720h de estudo, correspondendo também a uma percentagem grande de tempo em que o canal se encontra a seco. Esta situação pode ser originada pela localização da estação, nomeadamente, numa extremidade da Laguna, onde provavelmente a água não chega, ou pelo modelo ELCIRC, não conseguir gerar valores próximos dos reais nesta região. Na estação E13, os gráficos apresentam valores dentro dos intervalos normais em comparação com as outras estações, mas visto o canal ter uma largura representativa, é invulgar a percentagem de tempo em que o canal se encontra a seco. Como o modelo gera valores de altura de escoamento baixos, considera-se que o ponto escolhido para representação da secção não terá resultado na melhor análise.

5.1.2. Resumo

Tabela 5.1: Totais de deposição e de erosão, em função das marés.

Estação	Taxa de deposição (mg/m ²)			Taxa de erosão (mg/m ²)		
	MM	MMed	MV	MM	MMed	MV
E6	62,66	17,95	7,37	0,00	7330,14	156307,92
E8	7,48	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
E9	7,73	7,66	7,60	0,00	0,00	0,00
E10	7,58	6,53	5,81	0,00	0,00	0,00
E11	7,60	7,09	4,39	0,00	0,00	0,00
E12	64,60	51,00	44,12	0,00	0,00	0,00
E13	4,55	2,35	0,85	0,00	0,00	0,00
E15	53,10	49,93	33,09	0,00	0,00	0,00
E22	81,14	58,79	43,48	0,00	0,00	0,00
E23	56,30	33,81	0,00	0,00	0,00	92680,04
E24	82,14	80,33	10,68	0,00	0,00	0,00
E25	37,44	15,89	9,14	0,00	0,00	0,00
E26	80,40	55,40	49,06	0,00	0,00	0,00
E27	79,10	59,82	12,43	0,00	0,00	0,00
E28	76,87	29,53	15,58	0,00	0,00	0,00
E29	74,32	67,41	6,43	0,00	0,00	0,00
E30	80,22	44,45	20,38	0,00	0,00	0,00

As tabelas 5.1 e 5.2 apresentam, para todas as estações em que se considerou

predominância de sedimentos coesivos, o total da taxa de erosão e de deposição, divididas por marés e por períodos de enchente e vazante respectivamente. Os valores apresentados na tabela 5.1 correspondem à integração das áreas dos gráficos do anexo C.

Como era espectável, os totais da taxa de deposição diminuem de valor, da Maré Morta até à Maré Viva, em todas as estações do estudo. A taxa de deposição máxima ao longo das 13 horas do ciclo de maré em análise, é de 82,14 mg/m² na estação E24, em período de Maré Morta. O mínimo é de zero miligramas por metro quadrado numa estação em Maré Média e em duas estações em Maré Viva. Os totais das taxas de deposição ao longo das 720 horas do mês, rondam os 268 mg/m², representando 3216 mg por ano e por metro quadrado de área. Verifica-se que existem períodos de erosão que os valores da tabela 5.1 não revelam, pois os picos de velocidade que dão origem a esses valores elevados de erosão, não ocorrem dentro dos períodos de maré seleccionados como representativos de Marés Vivas, Médias e Mortas escolhidas e representadas tanto nos gráficos do anexo C, como na tabela 5.1.

Tabela 5.2: Totais de deposição e de erosão, num mês em função do sentido do escoamento.

Estação	Taxa de deposição (mg/m ²)		Taxa de erosão (mg/m ²)	
	Enchente	Vazante	Enchente	Vazante
E6	498,33	545,35	134207,01	1754463,94
E8	21,57	51,87	0,00	0,00
E9	242,80	180,41	0,00	0,00
E10	221,83	142,59	0,00	0,00
E11	123,09	191,28	0,00	0,00
E12	1115,75	1846,07	0,00	0,00
E13	60,57	54,41	0,00	23203,82
E15	1132,87	1275,09	0,00	0,00
E22	1919,13	1323,58	0,00	0,00
E23	525,55	726,96	495419,50	354779,93
E24	1343,11	1244,70	35380,22	0,00
E25	613,38	345,69	0,00	0,00
E26	1726,91	1401,05	0,00	0,00
E27	1235,00	872,14	0,00	219066,42
E28	1112,75	871,59	0,00	0,00
E29	1044,71	966,75	162642,80	2446,18
E30	1511,38	1106,54	0,00	0,00

Em geral, em cada estação, os totais de deposição em enchente, atingem valores um pouco superiores aos de vazante, mas em média os resultados são próximos. Desta forma é

possível afirmar que os sedimentos se depositam em igual quantidade em praticamente todos os pontos observados, qualquer que seja o sentido do escoamento.

No que toca aos totais da taxa de erosão, estes valores são nulos em 76 % das estações, em enchente e em 71 % das estações, em vazante. Existe erosão em enchente, em quatro pontos do estudo, e os totais para o ciclo de um mês rondam a média de 207 g/m². De forma análoga, em situação de vazante, a erosão apenas acontece em cinco das estações investigadas, mas o valor médio nesses pontos, ultrapassa os 471 g/m². Embora estes valores de erosão total sejam maiores do que os de deposição, não acontecem na grande maioria das estações e como tal, há maior probabilidade de assoreamento na generalidade das estações.

Para além dos valores expostos nas tabelas 5.1 e 5.2, apresenta-se na tabela 5.3, para cada ponto da Laguna os totais absolutos (brutos), da taxa de deposição e de erosão e o total líquido dividido em períodos de enchente e de vazante. No balanço final do mês de análise, o total líquido permite distinguir as estações por cores, exprimindo assim, se a estação sofre erosão, ou deposição de sedimentos e se o mecanismo ocorre em enchente ou em vazante.

Tabela 5.3: Totais brutos e líquidos da taxa de deposição e erosão.

Estação	Total Bruto (mg/m ²)		Total líquido (mg/m ²)		Total líquido (mg/m ²)
	Deposição	Erosão	Enchente	Vazante	
E6	1043,68	1888670,95	133708,69	1753918,59	1620209,90
E8	73,44	0,00	21,57	51,87	30,30
E9	423,22	0,00	242,80	180,41	62,39
E10	364,42	0,00	221,83	142,59	79,24
E11	314,37	0,00	123,09	191,28	68,19
E12	2961,82	0,00	1115,75	1846,07	730,32
E13	114,97	23203,82	60,57	23149,41	23088,84
E15	2407,96	0,00	1132,87	1275,09	142,22
E22	3242,71	0,00	1919,13	1323,58	595,55
E23	1252,52	850199,43	494893,94	354052,97	140840,98
E24	2587,81	35380,22	34037,11	1244,70	32792,41
E25	959,07	0,00	613,38	345,69	267,69
E26	3127,96	0,00	1726,91	1401,05	325,86
E27	2107,14	219066,42	1235,00	218194,27	216959,27
E28	1984,33	0,00	1112,75	871,59	241,16
E29	2011,46	165088,98	161598,09	1479,43	160118,65
E30	2617,93	0,00	1511,38	1106,54	404,84
EROSÃO EM ENCHENTE			EROSÃO EM VAZANTE		
DEPOSIÇÃO EM ENCHENTE			DEPOSIÇÃO EM VAZANTE		

Em onze das dezassete estações (65 %), observa-se que o balanço final corresponde a deposição de sedimentos, quer seja em situação de enchente ou de vazante. As estações E8 e E13 são as menos representativas em termos de quantidade bruta de material depositado. A percentagem de deposição de sedimentos em períodos de enchente ou de vazante é praticamente 50 % em todas as estações.

A maioria das estações não sofre erosão, mas aquelas em que acontece, o valor da taxa de erosão é bastante alto, e ocorre em correspondência com picos de velocidade. Como se verificou na tabela 5.1, estes máximos de taxa de erosão não ocorrem normalmente dentro das 13 horas que se consideram como sendo as da maré mais viva.

Apenas as estações E6, E13, E23, E24, E27 e E29 apresentam erosão e em todas estas estações se verificam os picos de taxa de erosão em horas em que a velocidade de escoamento é bastante superior à média e a altura de água do escoamento é reduzida. Desta forma, o cálculo da velocidade de atrito junto ao fundo resulta num valor elevado e conseqüentemente a tensão tangencial no fundo é maior.

5.1.3. Distribuição geográfica da deposição e da erosão na Ria de Aveiro

Os esquemas representativos das taxas de deposição e de erosão apresentados nas figuras 5.1 e 5.2 simbolizam a distribuição ao longo da Ria, dos valores apresentados na tabela 5.1 e na tabela 5.3.

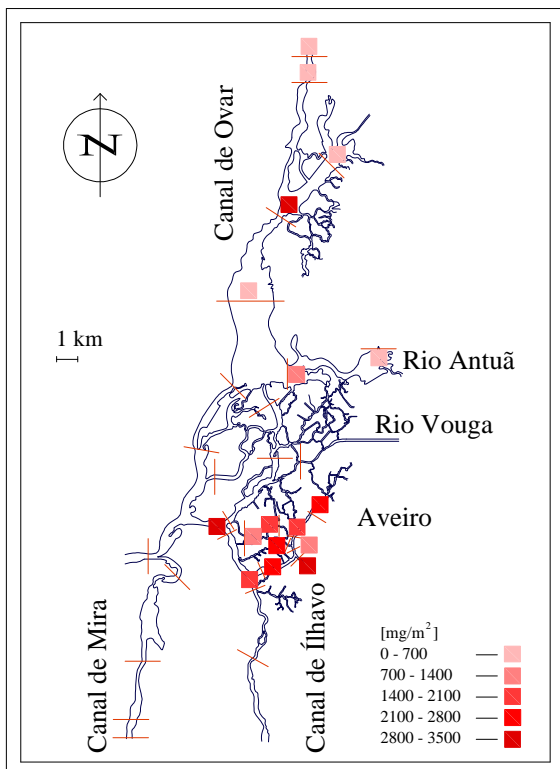
Em termos gerais nas diversas estações, em Maré Morta, os valores das taxas de deposição são mais elevados do que em Maré Média e estes são maiores do que os valores em Maré Viva. Há maior concentração de pontos de estudo na zona das marinhas, e nestes pontos, os totais da taxa de deposição apresentam os maiores valores de toda a Laguna.

Em termos de valores totais brutos (figuras 5.1a e 5.2a), o comportamento da taxa de deposição é similar à representação da figura 5.1b (Maré Morta) e no que concerne à taxa de erosão, assemelha-se à figura 5.2c (Maré Viva).

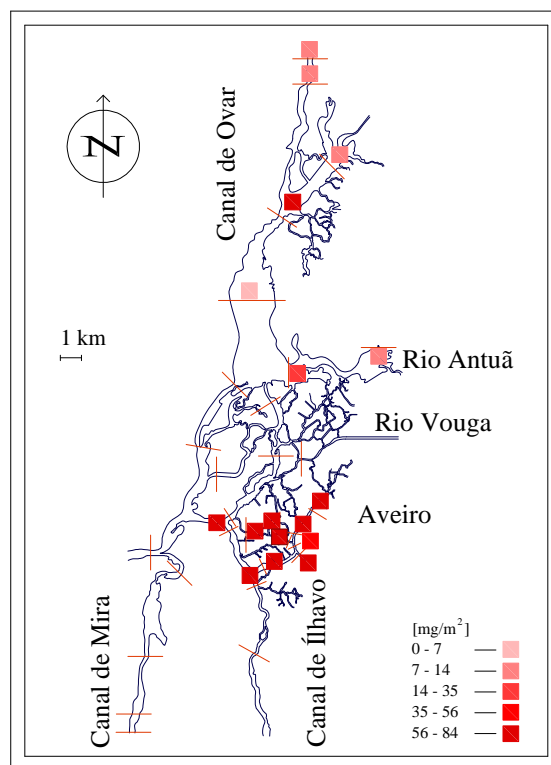
Os esquemas das taxas de erosão em Maré Morta e Maré Média apresentam apenas valores nulos, ou próximos de zero. Em Maré Viva observam-se valores já com algum significado também na zona das marinhas.

Os extremos do canal do Norte (Ovar), apresentam valores reduzidos, tanto de taxa de deposição, como taxa de erosão. A estação E8 tem um comportamento semelhante, embora

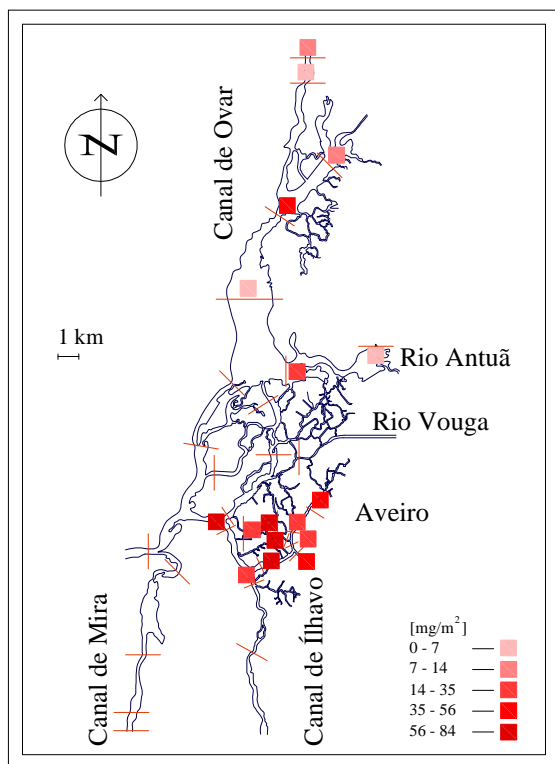
as razões dos baixos valores possam resultar de outros factores expostos anteriormente. Os canais mais estreitos são os que apresentam maior taxa de deposição e embora não seja um resultado tão esperado, a taxa de erosão é superior nas estações com secções médias.



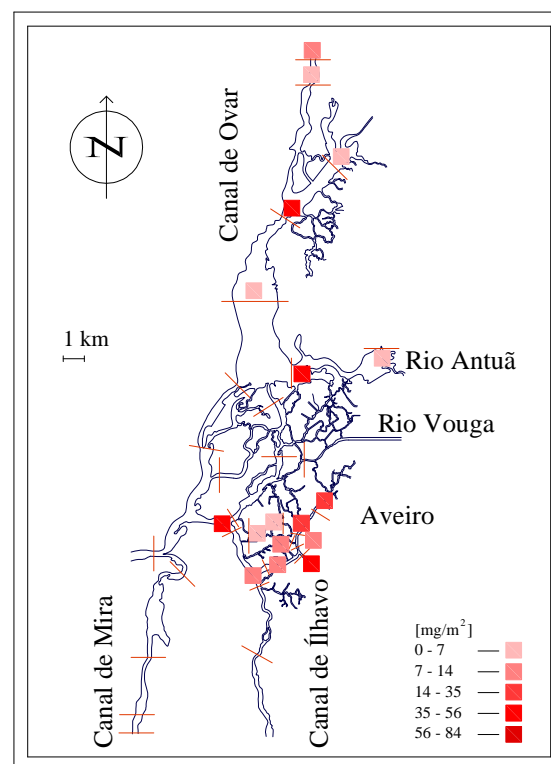
a) Valores totais.



b) Maré Morta.

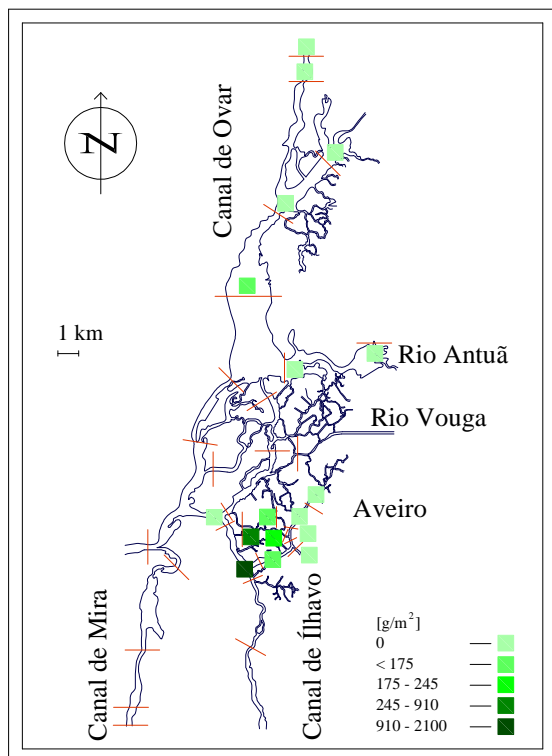


c) Maré Média.

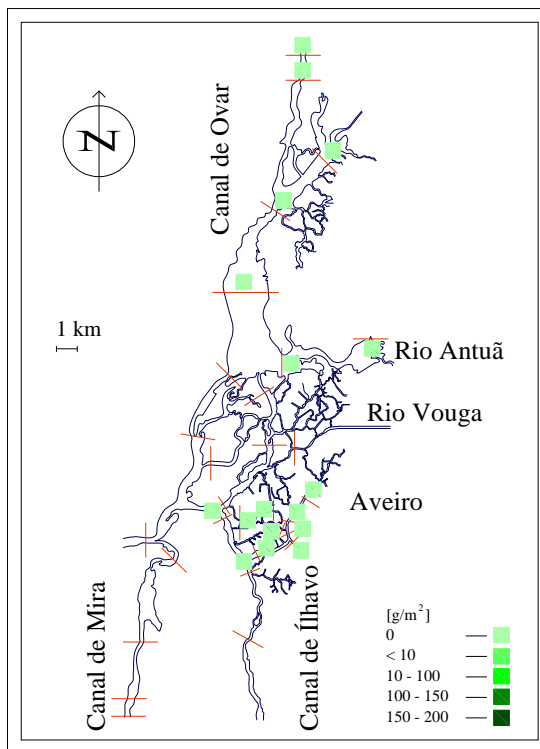


d) Maré Viva.

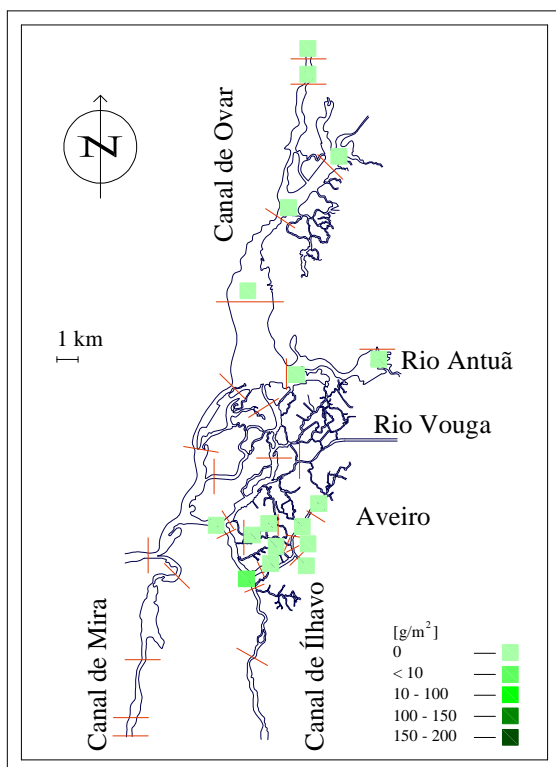
Figura 5.1: Taxas de deposição de sedimentos coesivos.



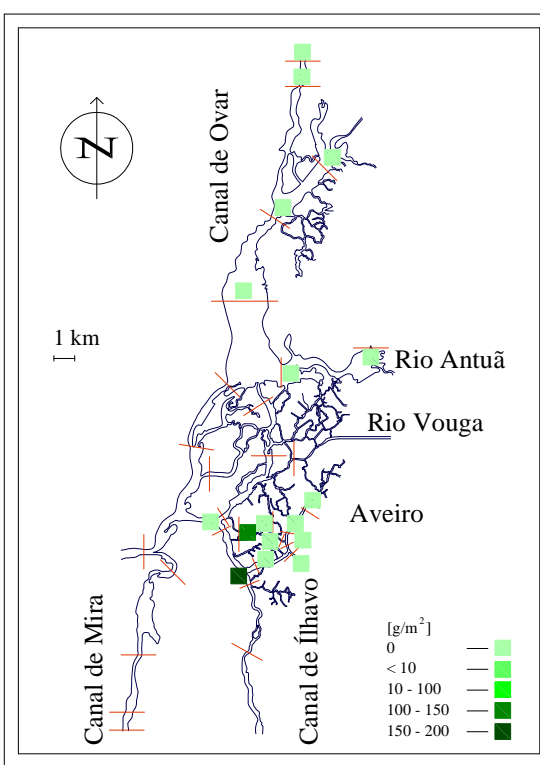
a) Valores totais.



b) Maré Morta.



c) Maré Média.



d) Maré Viva.

Figura 5.2: Taxas de erosão de sedimentos coesivos.

5.2. Comportamento de sedimentos não-coesivos

5.2.1. Transporte sedimentar ao longo dos ciclos de maré

Para as estações em que se consideraram os sedimentos maioritariamente não-coesivos, representam-se nos gráficos do anexo D, igualmente para as três marés escolhidas, a altura de escoamento, a velocidade de escoamento, o caudal sólido transportado por arrastamento, e em suspensão, bem como o caudal sólido total.

As estações E22 à E30 são novamente analisadas nesta fase, porque como referido anteriormente, considera-se que os sedimentos predominantes nestes pontos de estudo podem ser coesivos ou não-coesivos.

No geral o transporte sólido por arrastamento, o transporte em suspensão e a soma dos dois, ou seja, o transporte sólido total é baixo ou nulo, em Maré Morta e Maré Média. Este resultado é coerente com as baixas velocidades nestes ciclos de maré, e consequente pequena velocidade de atrito junto ao fundo, logo incapacidade de transporte de sedimentos.

Em situação de Maré Viva, na generalidade das estações ocorre transporte de sedimentos em períodos de enchente ou de vazante, e em alguns casos, nas duas fases. O volume transportado, por cada metro de secção é variável. Há casos de valores consideráveis, de cerca de $50 \text{ m}^3/\text{m}$ de valor máximo, na estação E1, em que as velocidades são grandes e na estação E17, com valor máximo de caudal transportado de $15 \text{ m}^3/\text{m}$. Nas restantes estações que também apresentam picos de caudal sólido transportado, os valores não vão além dos 2 a $3 \text{ m}^3/\text{m}$.

Nas estações da zona das marinhas, da E22 à E30, o transporte é sempre nulo em Maré Morta e Maré Média. Em Maré Viva apenas o caudal sólido em suspensão é nulo, mas os valores de caudal sólido por arrastamento e consequentemente o caudal sólido total, possuem valores reduzidos. Nestas estações, no cálculo do transporte sedimentar de acordo com as fórmulas de Van Rijn, para a parcela em suspensão, há uma condição de aplicação que não se verifica, e como tal considerou-se o cálculo nulo.

A estação E7 mostra-se uma das exceções, porque o caudal sólido total é nulo em qualquer das 720 horas do mês em estudo. O canal é muito estreito e as velocidades são sempre muito pequenas, justificando-se o transporte nulo, em qualquer das situações de

maré, embora se verifique escoamento numa grande percentagem de tempo (98%). Da mesma forma que nas estações da zona das marinhas, nesta estação, e nas estações E14 e E18 a condição de cálculo do caudal sólido em suspensão não se verifica. Nestas secções, a estreita largura do canal conduz a um valor de velocidade de atrito junto ao fundo reduzido, e assim, o quociente entre a velocidade de queda e a velocidade de atrito junto ao fundo (condição de cálculo de Van Rijn), resulta sempre num valor superior à unidade, não havendo lugar a cálculo do caudal transportado em suspensão.

Na estação E16 também não existe transporte de sedimentos. Embora a estação em causa tenha uma largura de canal significativa, as velocidades de escoamento geradas pelo modelo numérico são muito reduzidas e não há lugar à ocorrência de transporte sedimentar. Na estação E18, a não existência de movimento de sedimentos não-coesivos deve-se a uma grande percentagem de tempo em que não se verifica escoamento no canal (46%). Este problema pode surgir de dificuldades de representação do local no modelo numérico ElCIRC. Desta forma, o transporte sólido é aproximadamente nulo ao longo das 720h (um mês), em que se realizou o estudo.

Nas estações E21 e E26 em todos os ciclos de maré, o transporte é nulo, porque as estações em causa têm uma secção estreita e como tal as velocidades são reduzidas.

5.2.2. Resumo

A tabela 5.4 expõe para cada uma das 22 estações com sedimentos não-coesivos, o balanço do caudal sólido total em Maré Morta, Maré Média e Maré Viva. Posteriormente estes valores são representados de forma esquemática.

Em Maré Morta não há qualquer transporte de sedimentos nas 22 estações no total das 13 horas da investigação. Em Maré Média obtêm-se valores de caudal sólido total líquido em 45 % das estações e em Maré Viva esta percentagem sobe para 77 %, já com registo de valores significativos de transporte. O máximo caudal transportado em Maré Viva, é de 162,51 m³/m na estação E23 em enchente, e a média dos valores ronda os 12 m³/m.

Tabela 5.4: Balanço do caudal sólido total, no fim de 13 horas, consoante as marés.

Balanço do caudal sólido total (m ³ /m):			
Estação	MM	MMed	MV
E1	0,00	1,27	3,66
E2	0,00	0,00	0,05
E3	0,00	0,03	0,92
E4	0,00	0,12	3,01
E5	0,00	0,01	1,17
E7	0,00	0,00	0,00
E14	0,00	0,14	1,15
E16	0,00	0,00	0,00
E17	0,00	1,43	16,42
E18	0,00	0,00	0,00
E19	0,00	0,07	0,54
E20	0,00	0,00	0,03
E21	0,00	0,00	0,00
E22	0,00	0,00	1,02
E23	0,00	0,78	162,51
E24	0,00	0,00	26,33
E25	0,00	2,58	37,02
E26	0,00	0,00	0,00
E27	0,00	0,00	0,01
E28	0,00	0,38	7,83
E29	0,00	0,00	3,80
E30	0,00	0,00	0,64

A tabela 5.5, por sua vez, apresenta o caudal sólido transportado em enchente e vazante, dividido nas parcelas de caudal em suspensão e de arrastamento no fundo.

Há mais estações com transporte de sedimentos em suspensão, em período de enchente de maré do que em vazante, e o valor máximo desse transporte no total das 720 horas é igualmente superior durante a enchente do que na vazante. No entanto, a média dos totais de caudal sólido em suspensão em vazante é cerca de 233 m³/m e em enchente diminui para 195 m³/m. Nas estações E22 à E30 não se considerou qualquer valor de caudal sólido em suspensão, pelas razões descritas em 5.2.1, aquando da análise dos gráficos representativos do comportamento de cada maré.

No que concerne ao transporte de sedimentos por arrastamento, a situação repete-se, ou seja, em enchente há mais estações em que existe efectivamente transporte do que em vazante e o valor máximo desse caudal sólido no total do mês, é registado na estação E23, em enchente. A média dos caudais transportados por arrastamento toma valores próximos em enchente e em vazante, mas superiores à média da parcela em suspensão.

Tabela 5.5: Caudal sólido em suspensão e arrastamento, ao fim de um mês.

Estação	Caudal sólido em enchente (m ³ /m)		Caudal sólido em vazante (m ³ /m)	
	Suspensão	Arrastamento	Suspensão	Arrastamento
E1	1738,69	42,86	1559,19	40,95
E2	0,03	0,43	0,05	0,81
E3	4,80	39,57	12,86	123,39
E4	14,50	0,44	39,41	1,46
E5	4,23	0,04	15,06	0,24
E7	0,00	0,00	0,00	0,00
E14	11,48	5,01	10,18	38,86
E16	0,02	0,00	0,01	0,00
E17	559,18	43,58	688,85	87,17
E18	1,20	0,15	0,00	0,00
E19	6,98	0,20	0,15	0,00
E20	0,11	0,01	0,00	0,00
E21	0,04	0,00	0,09	0,00
E22	0,00	0,46	0,00	9,35
E23	0,00	1745,31	0,00	846,10
E24	0,00	897,53	0,00	235,66
E25	0,00	56,76	0,00	606,70
E26	0,00	0,00	0,00	0,94
E27	0,00	130,62	0,00	348,62
E28	0,00	118,50	0,00	308,42
E29	0,00	487,78	0,00	109,63
E30	0,00	1,58	0,00	12,89

Indica-se ainda, na tabela 5.6, as parcelas do caudal sólido total bruto em suspensão e arrastamento, e a soma destes dois valores, para cada estação. Através deste valor consegue-se compreender o volume de sedimentos que realmente atravessa cada secção em estudo. Da mesma forma, o balanço, ou seja, o caudal sólido total líquido, também está representado nesta tabela, no seu valor total e dividido nas parcelas de transporte em suspensão e por arrastamento junto ao fundo.

O valor absoluto de caudal que atravessa cada secção está explícito na quarta coluna da tabela 5.6 e o máximo valor observado é de 3381,67 m³/m para a estação E1 (Barra). A média do transporte total bruto ronda os 500 m³/m e em 19 % das estações o valor total bruto é superior a 1000 m³/m.

O caudal sólido total líquido expõe o balanço das quantidades de material que atravessam cada estação no ciclo completo e em qual das situações de maré predomina o transporte.

Em 59 % das estações, o caudal sólido transportado é maioritariamente durante a vazante. No entanto, o valor máximo líquido de 899,21 m³/m na estação E23, dá-se em enchente.

Tabela 5.6: Transporte sedimentar total, ao fim de um mês.

Estação	Transporte sedimentar bruto (m ³ /m)			Transporte sedimentar líquido (m ³ /m)		
	Suspensão	Arrastamento	Total	Suspensão	Arrastamento	Total
E1	3297,87	83,80	3381,67	179,50	1,91	181,41
E2	0,08	1,25	1,33	0,02	0,38	0,40
E3	17,66	162,96	180,62	8,07	83,82	91,89
E4	53,92	1,90	55,82	24,91	1,03	25,93
E5	19,29	0,29	19,58	10,83	0,20	11,03
E7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
E14	21,67	43,87	65,54	1,30	33,84	32,54
E16	0,03	0,00	0,03	0,01	0,00	0,01
E17	1248,03	130,75	1378,78	129,67	43,59	173,26
E18	1,20	0,15	1,36	1,20	0,15	1,35
E19	7,12	0,21	7,33	6,83	0,20	7,03
E20	0,11	0,01	0,12	0,11	0,01	0,12
E21	0,14	0,00	0,14	0,05	0,00	0,05
E22	0,00	9,82	9,82	0,00	8,89	8,89
E23	0,00	2591,41	2591,41	0,00	899,21	899,21
E24	0,00	1133,20	1133,20	0,00	661,87	661,87
E25	0,00	663,46	663,46	0,00	549,94	549,94
E26	0,00	0,94	0,94	0,00	0,94	0,94
E27	0,00	479,23	479,23	0,00	218,00	218,00
E28	0,00	426,92	426,92	0,00	189,91	189,91
E29	0,00	597,41	597,41	0,00	378,15	378,15
E30	0,00	14,47	14,47	0,00	11,32	11,32
TRANSPORTE EM ENCHENTE			TRANSPORTE EM VAZANTE			

Nas estações E2 e E3 a percentagem de material transportado junto ao fundo é de aproximadamente 92 %. Das estações E22 à E30, esta percentagem é considerada de 100 %. A percentagem de transporte em suspensão em enchente e de transporte junto ao fundo em enchente apresenta para a maioria das estações valores razoáveis. No entanto, as estações E18, E19 e E20 têm percentagens de 100 % ou perto deste valor, o que significa que em vazante não existe transporte sedimentar.

5.2.3. Distribuição geográfica do balanço do caudal sólido total na Ria de Aveiro

Na figura 5.3 apresenta-se geograficamente o balanço do caudal sólido total, esquematizando aquilo que foi descrito anteriormente. Em Maré Morta o transporte de sedimentos é nulo, aumentando o seu valor até à situação de Maré Viva, correspondente a maiores velocidades de escoamento. Em Maré Média já se notam pontos da Laguna central com valores de transporte mínimos e em Maré Viva, na zona das marinhas e na embocadura os valores são consideráveis, com máximos de $170 \text{ m}^3/\text{m}$, para as 13 horas estudadas. O esquema do balanço do caudal sólido total para as 720 horas do mês, é semelhante ao da Maré Viva, com valores dos intervalos proporcionais ao período em análise.

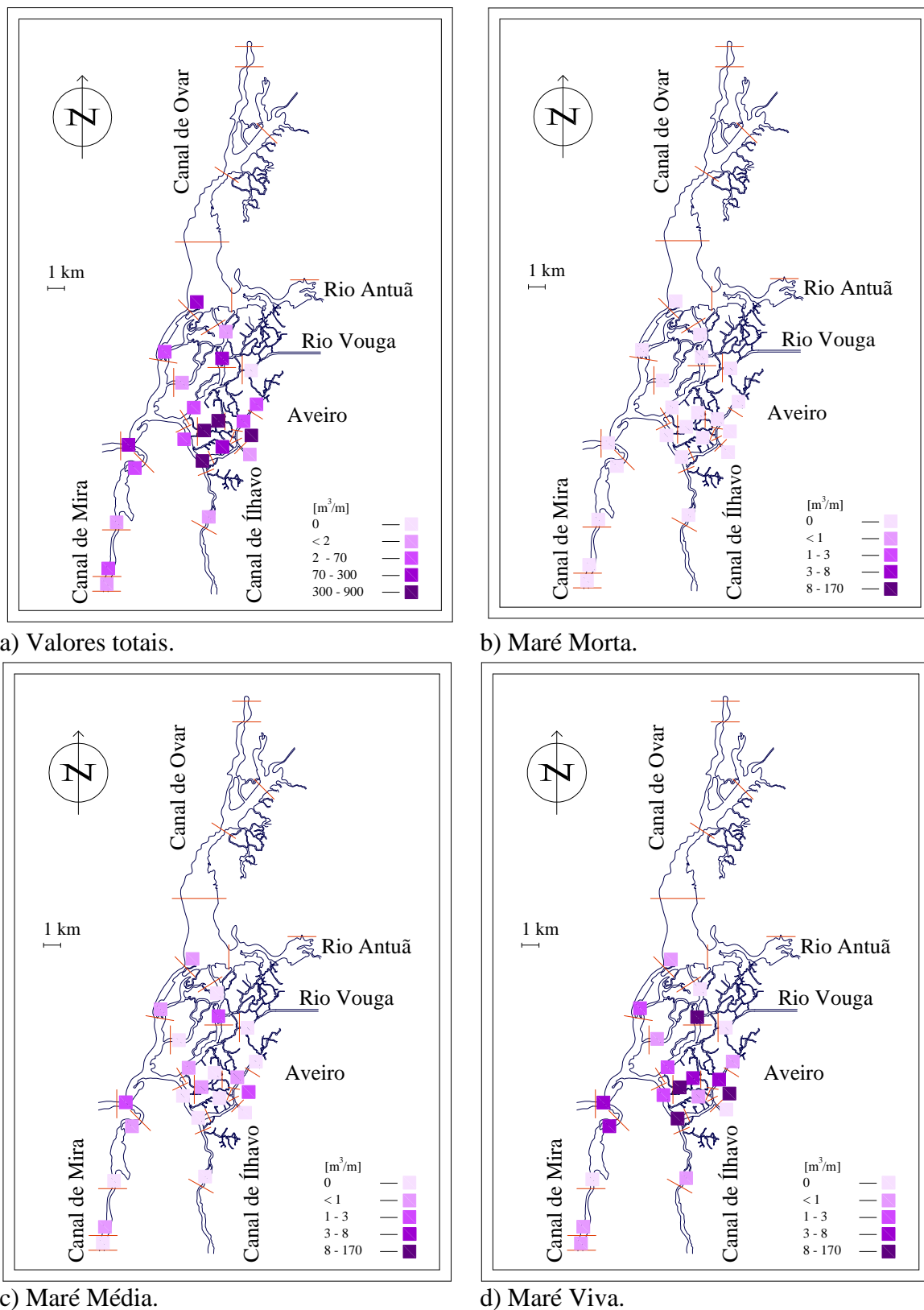


Figura 5.3: Balanço do caudal sólido total nas 22 estações de estudo.

5.3. Análise global

Em geral os cálculos efectuados para obter as taxas de deposição e de erosão, bem como o caudal sólido transportado originam resultados próximos do que seria esperado. Nesta análise final, compara-se os resultados obtidos, com valores apurados de balanço de transporte de sedimentos ocorrido entre 1953 e 1988, referidos pela JAPA (1989). Os relatórios de progressão apresentam gráficos de algumas das secções estudadas, com linhas representativas das cotas de fundo em 1953 e 1988, bem como um sombreado que indica se a secção estava a sofrer deposição ou erosão. Através desses gráficos realizou-se um balanço aproximado, entre estes dois mecanismos de transporte e assumiram-se os resultados expressos na tabela seguinte. Essa análise permite a comparação com os resultados do presente estudo para as estações em que existem dados da JAPA (1989).

Tabela 5.7: Comparação de resultados.

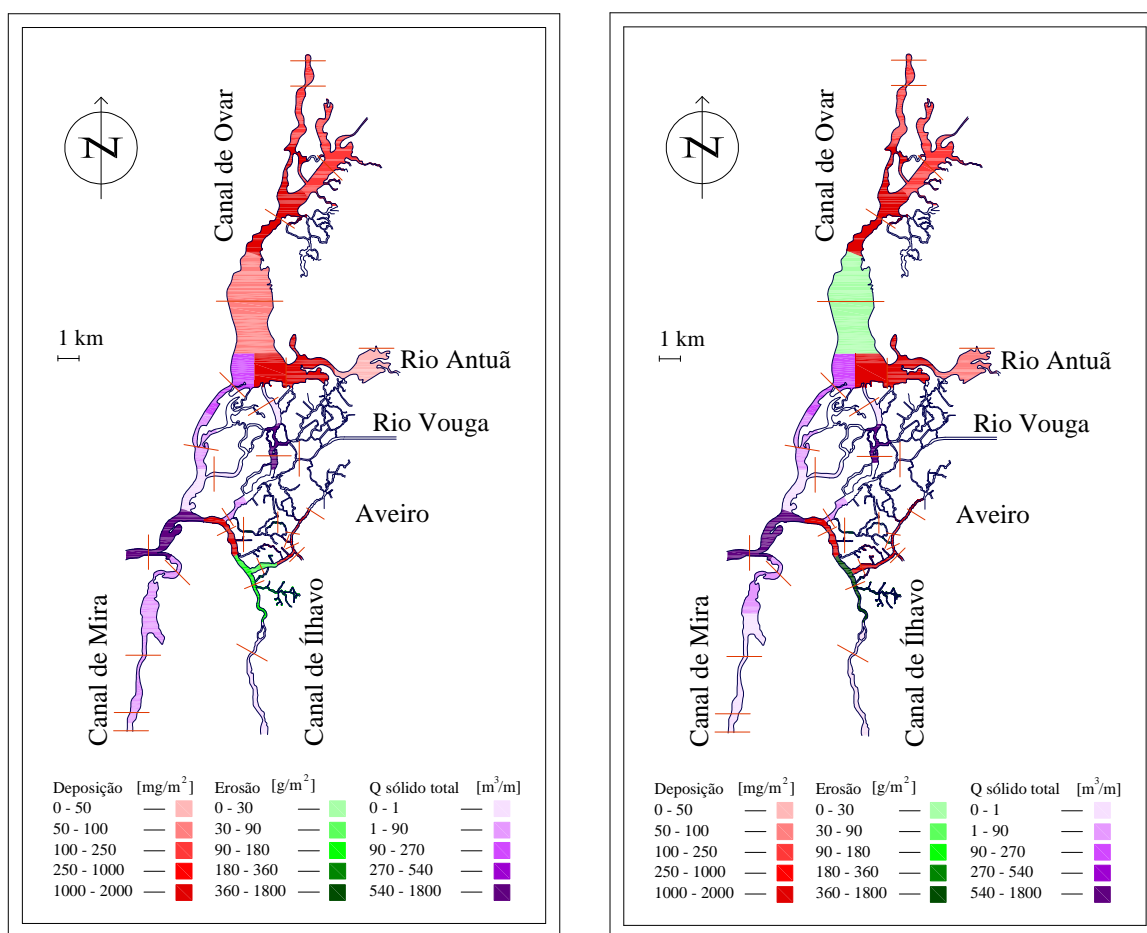
Estação	Hidroprojecto Balanço 1953-1988	Resultado de cálculos - 2010
E3	Erosão	Não há lugar a conclusões
E5	Erosão	Não há lugar a conclusões
E6	Erosão	Erosão
E8	Erosão	Assoreamento
E9	Assoreamento	Assoreamento
E10	Assoreamento	Assoreamento
E11	Assoreamento	Assoreamento
E12	Erosão	Assoreamento
E13	Erosão	Erosão
E14	Erosão	Não há lugar a conclusões
E15	Erosão	Assoreamento
E16	Erosão	Não há lugar a conclusões
E17	Erosão	Não há lugar a conclusões
E18	Assoreamento	Não há lugar a conclusões
E19	Neutro	Não há lugar a conclusões
E20	Assoreamento	Não há lugar a conclusões
E21	Erosão	Não há lugar a conclusões

Na tabela 5.7, em estações com predominância de sedimentos não-coesivos não foi possível obter conclusões, e comparar resultados, porque o facto de quantificar a capacidade de transporte, não permite afirmar se está a ocorrer deposição ou erosão nas

respectivas estações, já que não se sabe qual a quantidade de material que está a afluir à secção.

Nota-se, de forma geral, que há actualmente tendência para o assoreamento das secções referenciadas. Em parte das estações que em JAPA (1989), apresentavam erosão, também se obteve neste momento valores de erosão, mas outras evoluíram para uma situação em que há deposição de material sedimentar. Por outro lado, as estações que apresentavam em 1989 assoreamento, mantêm essa tendência.

Em 62,5 % das estações possíveis de comparar obtiveram-se resultados iguais ao estudo de 1989.



a) Taxas de transporte em enchente.

b) Taxas de transporte em vazante.

Figura 5.4: Representação das Taxas de deposição, de erosão e caudal sólido total.

A figura 5.4 representa as estimativas encontradas para as taxas de deposição, de erosão e transporte sedimentar, em valor absoluto, no período total de um mês, divididas em dois

esquemas, enchente e vazante. A área geográfica abrangida por cada secção em estudo, foi considerada cerca de metade da distância entre estações, e como tal há zonas que não estão coloridas, porque se situam longe dos pontos de estudo, não havendo certeza quanto ao comportamento dos sedimentos no local. O comportamento em enchente e vazante, é similar em praticamente todas as estações, havendo maior diferença, francamente visível na estação E13, que em enchente apresenta deposição de sedimentos e em vazante um pouco de erosão, nas estações E4, E18, E19 e E20, porque há maior quantidade de material transportado em enchente e na estação E6 que apresenta em vazante maior valor de erosão.

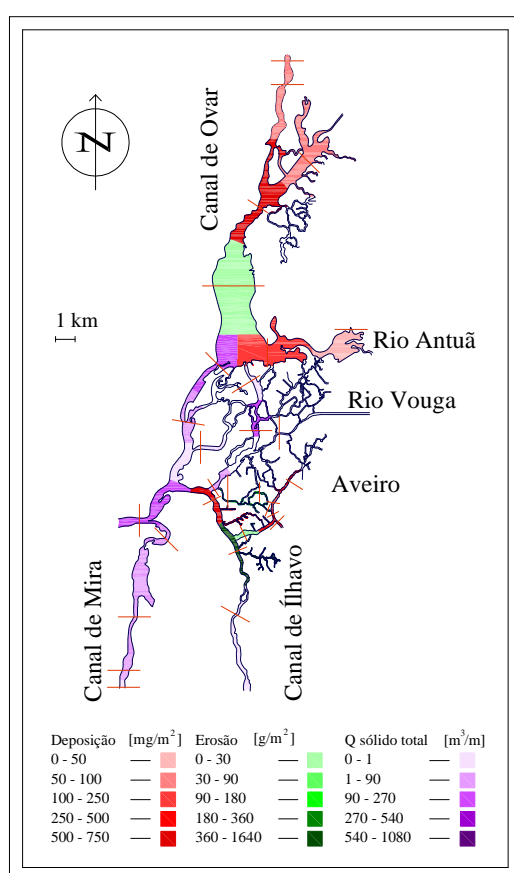


Figura 5.5: Taxas de transporte líquidas.

A figura 5.5 representa o balanço entre o material transportado em cada estação entre períodos de enchente e vazante. Nos canais do Norte, há exceção da estação E13, há deposição; na zona central das marinhas de sal ocorre erosão, e na zona mais a Este das marinhas há deposição; o canal de Mira apresenta transporte sedimentar no intervalo de 1 a 90 m³/m, e no canal de Ílhavo o transporte de sedimentos é mínimo; na zona da Barra o

balanço sedimentar situa-se no terceiro intervalo de valores, de 90 a 270 m³/m no ciclo de um mês de análise.

CAPÍTULO 6

6. ANÁLISE DOS RESULTADOS DA “VERSÃO ALAGADA”

6.1. Comportamento de sedimentos coesivos

6.1.1. Erosão e deposição ao longo dos ciclos de maré

Na generalidade das estações, o comportamento do transporte dos sedimentos é similar à versão originalmente analisada. A taxa de deposição atinge valores máximos em Maré Morta e em estofa de maré, e normalmente há erosão apenas em Maré Viva.

Nas estações que se situam na zona das marinhas notam-se maiores modificações. Embora a altura máxima de escoamento se mantenha constante, a altura mínima reduz-se e naturalmente a média também diminui, na generalidade das 720 horas de estudo. Como entra mais volume de água, proveniente da Barra, a velocidade máxima aumenta. Em termos de sentido do escoamento, tudo se mantém como representado na figura 3.7, à excepção da estação E27, onde o escoamento passa a fluir de Norte para Sul. Na estação E22, a deposição tem um comportamento mais de extremos, ou seja, em estofa de maré a taxa de deposição é máxima e em enchente e vazante tem valores mínimos, por vezes próximos de zero; na estação E24 a taxa de deposição não apresenta valores tão constantes como na versão original de cálculo, ao longo das 13 horas de cada ciclo; por sua vez, na estação E25 a erosão aumenta imenso, chegando a um máximo de 375 g/m^2 numa hora específica do ciclo de 13 horas da maré escolhida como a mais viva; as estações E27 e E29 tem praticamente o mesmo comportamento que a estação E25, apresentando valores muito elevados de erosão.

As estações E8 e E13 são os casos mais divergentes desta análise, tal como na versão original de cálculo.

6.1.2. Resumo

As tabelas 6.1 e 6.2 apresentam, para todas as estações em que se considerou predominância de sedimentos coesivos, o total da taxa de erosão e de deposição, divididas por marés e por períodos de enchente e vazante respectivamente.

Os totais da taxa de deposição diminuem de valor, da Maré Morta até à Maré Viva, em todas as estações do estudo. A taxa de deposição máxima ao longo das 13 horas do ciclo de maré em análise, é de 80,47 mg/m² na estação E26, em período de Maré Morta. Nas estações da zona das marinhas os valores de deposição são superiores aos valores da versão original, em praticamente todas as marés. O mínimo é de 0 mg/m² numa estação em Maré Média e em duas estações em Maré Viva.

As taxas de erosão aumentam imenso, havendo agora erosão em Maré Morta numa estação e em Maré Média e Maré Viva, quando existe erosão, os valores são elevados.

Tabela 6.1: Totais de deposição e de erosão, em função das marés.

Estação	Taxa de deposição (mg/m ²)			Taxa de erosão (mg/m ²)		
	MM	MMed	MV	MM	MMed	MV
E6	62,47	17,56	7,04	0,00	7538,16	159866,73
E8	7,51	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
E9	7,73	7,66	7,60	0,00	0,00	0,00
E10	7,58	6,53	5,83	0,00	0,00	0,00
E11	7,60	7,09	4,41	0,00	0,00	0,00
E12	64,60	51,00	44,12	0,00	0,00	0,00
E13	4,59	2,59	0,86	0,00	0,00	0,00
E15	53,10	49,96	33,10	0,00	0,00	0,00
E22	76,62	33,31	20,34	0,00	0,00	0,00
E23	52,81	4,80	4,34	0,00	0,00	56474,57
E24	78,27	56,45	18,33	0,00	0,00	0,00
E25	12,53	3,31	1,13	0,00	47357,76	1432690,89
E26	80,47	57,37	25,01	0,00	0,00	0,00
E27	9,72	6,90	0,00	8346,38	778215,64	6095069,09
E28	74,14	23,53	9,66	0,00	0,00	6095069,09
E29	11,80	10,74	4,95	0,00	0,00	769342,91
E30	80,45	50,73	25,01	0,00	0,00	0,00

Nas estações E27 e E28, nas 13 horas de Maré Viva a erosão atinge os 6 kg/m². Nesta fase, as velocidades do escoamento atingem 1,3 m/s.

Da análise da tabela 6.2 conclui-se que a soma da taxa de deposição das 17 estações resulta, em valores inferiores em enchente do que em vazante, mas em média os resultados são próximos. Em 41 % das estações a deposição em vazante é superior à deposição em enchente. O máximo é de 1846,25 mg/m²/mês na estação E12 em período de vazante, enquanto que os valores mínimos de taxa de deposição no período de um mês, ocorrem na estação E8.

No que toca aos totais da taxa de erosão, estes valores são nulos em 65 % das estações, em enchente e em vazante. Existe erosão em enchente, em seis pontos do estudo, e os totais para o ciclo de um mês rondam a média de 4,5 kg/m². De forma análoga, em situação de vazante, o valor médio nesses pontos, ultrapassa os 7,3 kg/m². Embora estes valores de erosão total sejam muito mais elevados do que os de deposição, não acontecem na grande maioria das estações e como tal, há maior probabilidade de assoreamento na generalidade das estações.

Tabela 6.2: Totais de deposição e de erosão, num mês em função do sentido do escoamento.

Estação	Taxa de deposição (mg/m ²)		Taxa de erosão (mg/m ²)	
	Enchente	Vazante	Enchente	Vazante
E6	507,32	534,18	128355,72	1806755,03
E8	21,51	51,79	1050,95	0,00
E9	243,42	179,85	0,00	0,00
E10	221,76	142,60	0,00	0,00
E11	123,85	190,89	0,00	0,00
E12	1114,16	1846,25	0,00	0,00
E13	63,15	56,05	0,00	62541,06
E15	1136,50	1271,00	0,00	0,00
E22	1071,07	1059,12	0,00	0,00
E23	439,34	361,83	218750,28	1012005,15
E24	1169,41	1383,91	0,00	0,00
E25	130,73	106,38	5043754,97	15120042,65
E26	1590,78	1315,31	0,00	0,00
E27	63,48	93,66	56722791,31	97881491,30
E28	879,27	756,53	0,00	0,00
E29	227,48	164,18	13915622,94	8421367,33
E30	1499,71	1295,01	0,00	0,00

Apresenta-se na tabela 6.3, para cada ponto da Laguna os totais absolutos (brutos), da taxa de deposição e de erosão e o total líquido dividido em períodos de enchente e de vazante. No balanço final do mês de análise, o total líquido permite distinguir as estações por cores, exprimindo assim, se a estação sofre erosão, ou deposição de sedimentos e se o mecanismo ocorre em enchente ou em vazante.

Em dez das dezassete estações (59 %), observa-se que o balanço final corresponde a deposição de sedimentos (as estações E8 e E25 passam a sofrer erosão). As estações E8 e E13 são as menos representativas em termos de quantidade bruta de material depositado.

O máximo de taxa de deposição ocorre na estação E12, cerca de 3 g/m²/mês (bruto) e a

máxima taxa de erosão no período de um mês acontece na estação E27, com valores de cerca de 700 vezes superiores à versão original de cálculo (155 kg/m²/mês).

A maioria das estações não sofre erosão, mas aquelas em que acontece, o valor da taxa de erosão é bastante alto, e ocorre em correspondência com picos de velocidade. Como se verificou na tabela 6.1, estes máximos de taxa de erosão não ocorrem normalmente dentro das 13 horas que se consideram como sendo as da maré mais viva.

Tabela 6.3: Totais brutos e líquidos da taxa de deposição e erosão.

Estação	Total Bruto (mg/m ²)		Total líquido (mg/m ²)		Total líquido (mg/m ²)
	Deposição	Erosão	Enchente	Vazante	
E6	1041,50	1935110,75	127848,40	1806220,85	1678372,45
E8	73,30	1050,95	1029,44	51,79	977,65
E9	423,27	0,00	243,42	179,85	63,57
E10	364,35	0,00	221,76	142,60	79,16
E11	314,75	0,00	123,85	190,89	67,04
E12	2960,41	0,00	1114,16	1846,25	732,09
E13	119,20	62541,06	63,15	62485,01	62421,86
E15	2407,50	0,00	1136,50	1271,00	134,50
E22	2130,19	0,00	1071,07	1059,12	11,95
E23	801,16	1230755,43	218310,95	1011643,32	793332,37
E24	2553,33	0,00	1169,41	1383,91	214,50
E25	237,11	20163797,62	5043624,24	15119936,27	10076312,03
E26	2906,09	0,00	1590,78	1315,31	275,47
E27	157,14	154604282,62	56722727,83	97881397,64	41158669,81
E28	1635,80	0,00	879,27	756,53	122,74
E29	391,66	22336990,27	13915395,46	8421203,15	5494192,31
E30	2794,72	0,00	1499,71	1295,01	204,70
EROSÃO EM ENCHENTE			EROSÃO EM VAZANTE		
DEPOSIÇÃO EM ENCHENTE			DEPOSIÇÃO EM VAZANTE		

Em 35 % das estações, no balanço final, ocorre deposição em período de enchente e em 24 % ocorre em vazante. Nas restantes estações, o balanço resulta em erosão, com maior incidência em vazante.

6.2. Comportamento de sedimentos não-coesivos

6.2.1. Transporte sedimentar ao longo dos ciclos de maré

No geral, o transporte sólido por arrastamento, o transporte em suspensão e a soma dos

dois, ou seja, o transporte sólido total é baixo ou nulo, em Maré Morta e Maré Média. Este resultado é coerente com as baixas velocidades nestes ciclos de maré, e consequente pequena velocidade de atrito junto ao fundo, logo incapacidade de transporte de sedimentos.

Em situação de Maré Viva, na generalidade das estações ocorre transporte de sedimentos em períodos de enchente ou de vazante, e em alguns casos, nas duas fases. O volume transportado, por cada metro de secção é variável.

As grandes alterações, devido ao alagamento das marinhas de sal, surgem nas estações dessa mesma zona, de forma análoga ao constatado nos resultados dos sedimentos coesivos. A estação E22 passa a ter um maior caudal de arrastamento transportado em situação de Maré Média e Maré Viva; na estação E23 a grande percentagem de material é agora transportado em vazante, enquanto que na situação original, ocorria maior transporte sedimentar em período de enchente; o caudal sólido por arrastamento passa de nulo, a um valor significativo em Maré Viva, na estação E24, acontecendo o mesmo na estação E25 em Maré Média; o caudal sólido arrastado chega aos $25 \text{ m}^3/\text{m}$, numa hora específica do ciclo de Maré Viva, na E25; e por último, na estação E27 ocorre agora transporte por arrastamento em Maré Morta, o que na versão original não acontecia, e na E27 e E29 em Maré Média e Maré Viva os valores de caudal crescem de forma excessiva. Nestas estações, no cálculo do transporte sedimentar de acordo com as fórmulas de Van Rijn, para a parcela em suspensão, há uma condição de aplicação que não se verifica, e como tal considerou-se o cálculo nulo.

6.2.2. Resumo

A tabela 6.4 expõe para cada uma das 22 estações com sedimentos não-coesivos, o balanço do caudal sólido total em Maré Morta, Maré Média e Maré Viva. Em Maré Morta há transporte de sedimentos apenas em 14 % das 22 estações, no total das 13 horas da investigação. Em Maré Média obtêm-se valores de caudal sólido total em 59 % das estações (maior percentagem do que na versão original) e em Maré Viva esta percentagem sobe para 91 %, já com registo de valores significativos de transporte. O máximo caudal transportado em Maré Viva, é cerca de $267000 \text{ m}^3/\text{m}$, um valor muito superior ao obtido

nos cálculos iniciais, na estação E27 em enchente, e a média para todas as estações, nas três marés ronda os 5000 m³/m.

Tabela 6.4: Balanço do caudal sólido total, no fim de 13 horas, consoante as marés.

Estação	Balanço do caudal sólido total (m ³ /m):		
	MM	MMed	MV
E1	0,00	1,27	13,22
E2	0,00	0,00	0,06
E3	0,00	0,03	0,93
E4	0,00	0,12	3,00
E5	0,00	0,03	1,86
E7	0,00	0,00	0,00
E14	0,00	0,14	1,18
E16	0,00	0,00	0,00
E17	0,00	1,48	14,38
E18	0,00	0,00	0,01
E19	0,00	0,07	0,52
E20	0,00	0,00	0,03
E21	0,00	0,00	0,01
E22	0,00	0,33	18,21
E23	0,00	4,66	135,05
E24	0,00	0,00	7,57
E25	1,86	496,34	55510,75
E26	0,00	0,00	0,02
E27	39,11	3965,73	266841,13
E28	0,00	0,05	14,32
E29	1,65	13,47	3035,10
E30	0,00	0,00	0,05

A tabela 6.5, por sua vez, apresenta o caudal sólido transportado em enchente e vazante, dividido nas parcelas de caudal em suspensão e de arrastamento no fundo.

Há mais estações com transporte de sedimentos em suspensão, em período de enchente de maré do que em vazante, e o valor máximo desse transporte no total das 720 horas é igualmente superior durante a enchente (aproximadamente 2200 m³/m na E1). No entanto, a média dos totais de caudal sólido em suspensão, em enchente e vazante é praticamente igual. Nas estações E22 à E30 não se considerou qualquer valor de caudal sólido em suspensão, pelas razões descritas em 6.2.1, aquando da análise dos gráficos representativos do comportamento de cada maré.

No que concerne ao transporte de sedimentos por arrastamento, a situação repete-se, ou seja, em enchente há mais estações em que existe efectivamente transporte do que em

vazante e o valor máximo desse caudal sólido no total do mês, é registado na estação E27, em enchente. A média dos caudais transportados por arrastamento toma valores maiores em enchente do que em vazante, mas bastante superiores à média da parcela em suspensão.

Tabela 6.5: Caudal sólido em suspensão e arrastamento, ao fim de um mês.

Estação	Caudal sólido em enchente (m ³ /m)		Caudal sólido em vazante (m ³ /m)	
	Suspensão	Arrastamento	Suspensão	Arrastamento
E1	2199,64	56,79	2075,09	57,92
E2	0,03	0,48	0,06	0,93
E3	4,83	40,14	12,91	139,13
E4	13,90	0,42	39,02	1,45
E5	5,33	0,05	21,99	0,35
E7	0,00	0,00	0,00	0,00
E14	9,89	4,67	10,28	17,89
E16	0,01	0,00	0,01	0,00
E17	573,90	45,03	719,40	93,94
E18	0,00	0,87	0,00	0,01
E19	6,72	0,19	0,14	0,00
E20	0,11	0,01	0,00	0,00
E21	0,04	0,00	0,09	0,00
E22	0,00	118,75	0,00	276,15
E23	0,00	664,01	0,00	2500,04
E24	0,00	47,87	0,00	8,61
E25	0,00	105513,09	0,00	473017,53
E26	0,00	0,00	0,00	1,47
E27	0,00	6141209,32	0,00	3903427,00
E28	0,00	247,75	0,00	532,54
E29	0,00	92418,78	0,00	84255,31
E30	0,00	0,81	0,00	4,27

Indica-se ainda, na tabela 6.6, as parcelas do caudal sólido total bruto em suspensão e arrastamento, e a soma destes dois valores, para cada estação. Através deste valor consegue-se compreender o volume de sedimentos que realmente atravessa cada secção em estudo. Da mesma forma, o balanço, ou seja, o caudal sólido total líquido, também está representado nesta tabela, no seu valor total e dividido nas parcelas de transporte em suspensão e por arrastamento junto ao fundo.

O valor absoluto de caudal que atravessa cada secção toma o valor máximo de cerca de 10 milhões de metros cúbicos por metro para a estação E27 (Marinhas). A média do transporte total bruto ronda os 500000 m³/m e em 27 % das estações o valor total bruto é superior a 1000 m³/m.

Tabela 6.6: Transporte sedimentar total, ao fim de um mês.

Estação	Transporte sedimentar bruto (m ³ /m)			Transporte sedimentar líquido (m ³ /m)		
	Suspensão	Arrastamento	Total	Suspensão	Arrastamento	Total
E1	4274,73	114,70	4389,44	124,55	1,13	123,42
E2	0,09	1,41	1,50	0,02	0,45	0,47
E3	17,73	179,27	197,01	8,08	98,99	107,07
E4	52,93	1,86	54,79	25,12	1,03	26,15
E5	27,32	0,41	27,72	16,66	0,30	16,96
E7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
E14	20,17	22,56	42,72	0,40	13,23	13,62
E16	0,02	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00
E17	1293,30	138,97	1432,27	145,50	48,91	194,41
E18	0,00	0,88	0,88	0,00	0,86	0,87
E19	6,86	0,20	7,06	6,58	0,19	6,77
E20	0,11	0,01	0,12	0,11	0,01	0,12
E21	0,13	0,00	0,13	0,04	0,00	0,04
E22	0,00	394,91	394,91	0,00	157,40	157,40
E23	0,00	3164,06	3164,06	0,00	1836,03	1836,03
E24	0,00	56,48	56,48	0,00	39,26	39,26
E25	0,00	578530,62	578530,62	0,00	367504,44	367504,44
E26	0,00	1,47	1,47	0,00	1,47	1,47
E27	0,00	10044636,31	10044636,31	0,00	2237782,32	2237782,32
E28	0,00	780,29	780,29	0,00	284,79	284,79
E29	0,00	176674,09	176674,09	0,00	8163,47	8163,47
E30	0,00	5,08	5,08	0,00	3,46	3,46
TRANSPORTE EM ENCHENTE			TRANSPORTE EM VAZANTE			

Os valores absolutos são extremamente elevados, e muito superiores aos valores encontrados para a situação original.

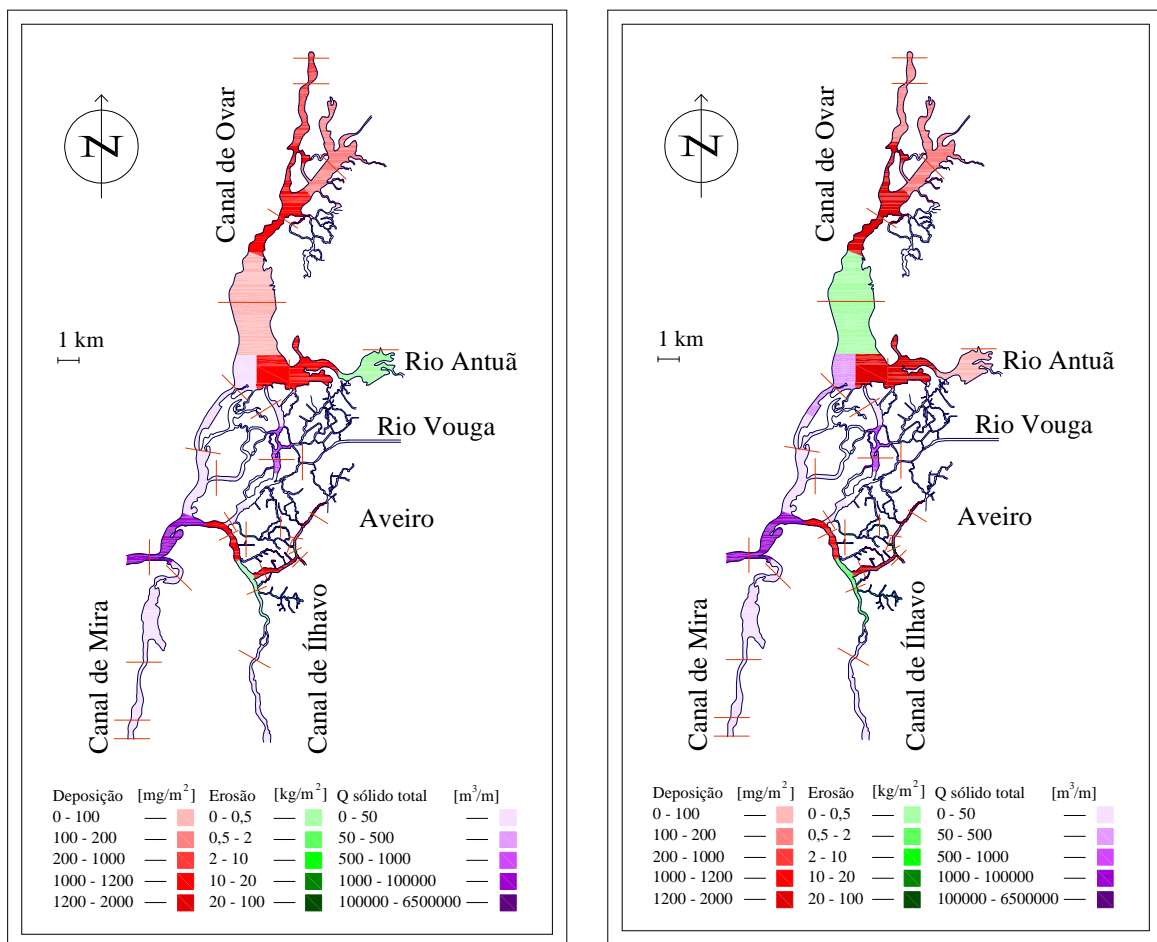
O caudal sólido total líquido expõe o balanço das quantidades de material que atravessam cada estação no ciclo completo e em qual dos períodos de maré predomina o transporte. Em 68 % das estações, o caudal sólido é maioritariamente transportado durante a vazante. No entanto, o valor máximo líquido de 2237782 m³/m na estação E27, dá-se em enchente. Esta observação vai de encontro aos resultados do capítulo 5, de estimativas de transporte, ocorrendo também o valor máximo de transporte em enchente.

Nas estações E2, E3, E14 e E18 a percentagem de material transportado junto ao fundo é de aproximadamente 96 %. Das estações E22 à E30, esta percentagem é considerada de

100 %. Tal como na versão original, as estações E18, E19 e E20 têm percentagens de transporte em enchente de 100 % ou aproximadamente esse valor, o que significa que em vazante não existe transporte sedimentar.

6.3. Análise global

A figura 6.1 representa as estimativas encontradas para as taxas de deposição, de erosão e transporte sedimentar, em valor absoluto, no período total de um mês, divididas em dois esquemas, enchente e vazante. A área geográfica abrangida por cada secção em estudo, foi considerada cerca de metade da distância entre estações, e como tal há zonas que não estão coloridas, porque se situam longe dos pontos de estudo, não havendo certeza quanto ao comportamento dos sedimentos no local.



a) Taxas de transporte em enchente.

b) Taxas de transporte em vazante.

Figura 6.1: Representação das Taxas de deposição, de erosão e caudal sólido total.

O comportamento em enchente e vazante, é similar em praticamente todas as estações, havendo maior diferença, francamente visível na estação E13, que em enchente apresenta deposição de sedimentos mínima e em vazante um pouco de erosão; nas estações E15 e E24 há mais deposição em período de vazante; na E8 passa-se de um estado de deposição em enchente, para erosão de valor reduzido em vazante; na estação E6 aumenta a erosão em vazante e na estação E3 há mais transporte de material em vazante. Em comparação com a versão original de cálculo as únicas diferenças notam-se na estação E8, que inicialmente só apresentava deposição e nas estações E4, E18 e E19 que originalmente apresentavam mais transporte de sedimentos em enchente do que nesta observação.

A figura 6.2 representa o balanço entre o material transportado em cada estação entre períodos de enchente e vazante. Nos canais do Norte, há exceção da estação E13, há deposição; na zona central das marinhas de sal ocorre erosão (E23 e E29), e na zona mais a Sul e Este das marinhas há valores significativos de deposição; o canal de Mira apresenta transporte sedimentar com valores na casa dos dois primeiros intervalos de caudal sólido total, e no canal de Ílhavo o transporte de sedimentos é mínimo; na zona da Barra o balanço sedimentar situa-se de 50 a 200 m³/m no ciclo de um mês de análise. O intervalo de valores apresentados para o caudal sólido total toma valores na ordem dos milhões de metros cúbicos por metro de secção, mas estes valores verificam-se para as estações da zona das marinhas.

Não é realizada a representação na zona das marinhas para os valores de caudal transportado, mas sim para as estimativas de deposição e de erosão, pois deduz-se que nestes pontos, os cálculos efectuados tendo em conta a predominância de sedimentos coesivos são mais acertados.

Em comparação com os resultados esquematizados na análise da versão original de cálculo, observa-se que a estação E8 sofre nesta fase erosão, enquanto que anteriormente se verificava uma deposição ligeira; na estação E22 passa a depositar-se mais material; na estação E6 a erosão não é tão intensa; na estação E24 passa a haver deposição na ordem dos 140 a 280 mg/m², e na versão original ocorria erosão ligeira e no canal de Mira ocorre agora menos transporte de sedimentos arenosos.

É de salientar que embora se faça a comparação entre os esquemas desta fase de análise e da versão original de cálculo, esta observação foi ponderada, tendo em conta que os valores dos intervalos agora considerados são muito diferentes no que toca à taxa de erosão

de sedimentos, e o caudal sólido total também toma valores muito superiores, principalmente no último intervalo considerado.

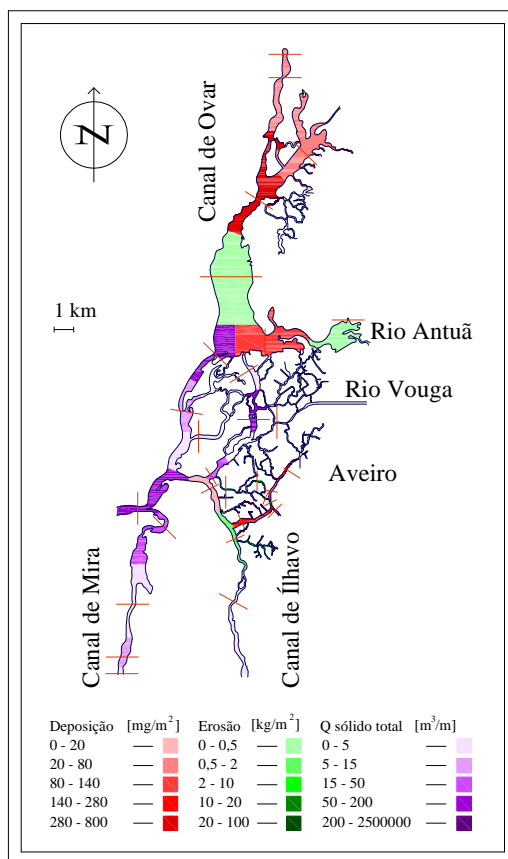


Figura 6.2: Taxas de transporte líquidas.

CAPÍTULO 7

7. DISPOSIÇÕES FINAIS

7.1. Conclusões

A caracterização hidrodinâmica e de transporte sedimentar da Ria de Aveiro engloba a identificação de diversos mecanismos de transporte dos sedimentos que nela existem. Distinguem-se dois tipos primordiais de sedimentos na Laguna, os sedimentos coesivos e os não-coesivos.

Nesta investigação, realizaram-se cálculos para estimar os mecanismos de deposição, de erosão e o caudal sólido total de sedimentos transportados (coesivos e não coesivos).

Em toda a Ria de Aveiro foram escolhidas 30 estações de estudo (divididas entre estações onde predominam os sedimentos coesivos (finos), e outras onde predominam os sedimentos não-coesivos), para efectuar os cálculos, e uma representação esquemática da situação actual sentida em toda a Laguna, em termos de transporte sedimentar.

A taxa de deposição foi estimada à custa da fórmula de Krone. Os parâmetros necessários ao cálculo, como a velocidade de queda, ou a probabilidade de deposição, resultam igualmente de expressões investigadas e a concentração de matéria particulada em suspensão foi obtida através de valores publicados, e ensaios laboratoriais sobre sedimentos das secções indicadas como estações de estudo. A tensão tangencial crítica de deposição total essencial ao cálculo da probabilidade de deposição, proveio de valores de Costa e Coelho (2010).

A taxa de erosão, resulta da expressão de Ariathurai e Partheniades, como especificado no capítulo 2, e os argumentos que lhe dão origem, foram determinados com base em expressões de Hwang e Mehta. Tendo em conta Huang *et al.* (2006), a constante da taxa de erosão superficial foi calculada à custa da expressão 2.07 e de acordo com Alves (2009), a tensão tangencial crítica de erosão superficial resultou da fórmula 2.08.

Por fim, o cálculo do transporte sólido total, dividido por parcelas de transporte em suspensão e arrastamento foi calculado à custa das formulações de Van Rijn, considerando cada argumento descrito no ponto 2.2.

Os parâmetros relativos ao escoamento e necessários para encontrar as estimativas de transporte que se propuseram, provêm fundamentalmente do modelo numérico descrito no capítulo 3. O modelo numérico ELCIRC permitiu conhecer a velocidade de escoamento e a

altura da coluna de água, para todas as estações de estudo escolhidas, para o período de 720 horas, ou seja, um ciclo de um mês de investigação.

Os resultados que se apresentaram no capítulo 5 são referentes às estimativas feitas para as taxas de deposição e de erosão (17 estações) e ao cálculo do transporte sólido total (22 estações). Para os dois tipos de estações, a análise feita, pondera acerca dos resultados em diferentes situações de maré (Maré Morta, Maré Média e Maré Viva), e sobre totais encontrados, para o ciclo completo de 30 dias. O estudo vai além, apresentando-se os resultados também divididos por períodos de escoamento, em enchente e vazante.

Numa análise geral, em praticamente todas as estações com predominância de sedimentos coesivos, há deposição. A taxa de deposição apresenta-se praticamente constante e com valores baixos (entre 0 e 6 mg/m²) ao longo das 13 horas de cada ciclo de maré analisadas, para todas as estações em estudo. A deposição atinge normalmente valores superiores em Maré Morta porque as velocidades são mais baixas, logo há maior probabilidade dos sedimentos se depositarem.

Os totais das taxas de deposição ao longo das 720 horas do mês, rondam os 268 mg/m², representando 3216 mg por ano e por metro quadrado de área.

Conclui-se ainda que os sedimentos se depositam em igual quantidade em praticamente todos os pontos observados, qualquer que seja o sentido do escoamento.

Em onze das dezassete estações (65 %), o balanço final corresponde a deposição de sedimentos. Os locais onde há erosão, são somente a estação E13, na qual os cálculos não resultaram em todas as análises nos valores espectáveis, e as estações E6, E23 e E29 na zona das marinhas. A estação E6 é a que apresenta valores mais significativos de taxa de erosão.

Nas estações com predominância de sedimentos não-coesivos, em Maré Morta não há qualquer transporte de sedimentos, nas 22 estações e no total das 13 horas da investigação. Em Maré Média obtêm-se valores de caudal sólido total líquido em 45 % das estações e em Maré Viva esta percentagem sobe para 77 %, já com registo de valores significativos de transporte.

Há mais estações com transporte de sedimentos em suspensão, em período de enchente de maré do que em vazante, e o valor máximo desse transporte no total das 720 horas é igualmente superior durante a enchente do que na vazante. No que concerne ao transporte de sedimentos por arrastamento, a situação repete-se, ou seja, em enchente há mais

estações em que existe efectivamente transporte do que em vazante e o valor máximo desse caudal sólido no total do mês, é registado na estação E23, em enchente.

O valor absoluto de caudal que atravessa cada secção é máximo na estação E1 (Barra) e o valor observado é de 3381,67 m³/m. A média do transporte total bruto ronda os 500 m³/m e em 19 % das estações o valor total bruto é superior a 1000 m³/m.

O caudal sólido total líquido expõe o balanço das quantidades de material que atravessam cada estação no ciclo completo e em qual das situações de maré predomina o transporte.

Em 59 % das estações, o caudal sólido transportado é maior durante a vazante. No entanto, o valor máximo líquido de 899,21 m³/m na estação E23, dá-se em enchente.

A zona Oeste da Laguna apresenta transporte de sedimentos significativo, na ordem dos 90 a 270 m³/m/ mês, havendo dentro desta região, estações com valores inferiores. No canal de Mira não se ultrapassam o 25 m³/m, e no de Ílhavo o transporte é mínimo.

Numa análise comparativa dos dados obtidos para toda a Laguna, com os valores apurados do balanço de transporte de sedimentos ocorrido entre 1953 e 1988, referidos pela JAPA (1989), pode-se afirmar que há actualmente uma tendência para o assoreamento das secções. Em parte das estações que em JAPA (1989), apresentavam erosão, também se obteve neste momento valores de erosão, mas outras evoluíram para uma situação em que há deposição de material sedimentar. Por outro lado, as estações que apresentavam em 1989 assoreamento, mantêm essa tendência.

No capítulo 6, expuseram-se o mesmo tipo de resultados que no capítulo 5, mas para a situação de alagamento da zona das marinhas, estudando-se o impacto destas alterações em toda a Laguna. Fez-se a comparação das duas situações de cálculo, há excepção da representação esquemática das taxas de deposição e erosão, e caudal sólido total em termos totais e em função das marés. Os resultados são muito semelhantes, e onde se encontram maiores alterações, é realmente na zona das marinhas.

Nas estações da zona das marinhas os valores de deposição são superiores aos valores da versão original, em praticamente todas as marés.

O máximo de taxa de deposição ocorre na estação E12, cerca de 3 g/m²/mês (bruto) e a máxima taxa de erosão no período de um mês acontece na estação E27, com valores 700 vezes superiores à versão original de cálculo.

Em dez das dezassete estações (59 %), observa-se que o balanço final corresponde a deposição de sedimentos (número de estações inferior à versão original).

Na análise dos 22 pontos definidos como pertencentes às estações com sedimentos não-coesivos, conclui-se que os valores absolutos são extremamente elevados, na zona das marinhas, e muito superiores aos valores encontrados para a situação original. Por outro lado, nas estações da zona Oeste da Laguna, o balanço do transporte sedimentar resulta em valores inferiores, à excepção da estação E1, na Barra.

Considera-se que esta última versão de cálculo resulta em valores extremos, no que concerne às estimativas de transporte de sedimentos, principalmente na zona das marinhas. E pelo contrário, os resultados expostos no capítulo 5, são aceitáveis, de acordo com o conhecimento do desenvolvimento da hidrodinâmica da Ria de Aveiro. Os esquemas representativos dos mecanismos de transporte, não contemplam os valores encontrados para o caudal sólido total, encontrados para a zona das marinhas, porque se definiu no final da análise, que os valores de taxas de deposição e de erosão encontrados se ajustavam melhor à zona de estudo.

7.2. Desenvolvimentos futuros

Com base no trabalho desenvolvido, considera-se agora importante a monitorização de algumas estações de estudo, de forma a avaliar os resultados expostos. Para os desenvolvimentos futuros desta investigação, propõem-se ensaios laboratoriais sobre material recolhido, em todas as secções dos pontos em análise. Com os valores dos parâmetros que resultam das análises, seria importante refazer os cálculos, estimando novas taxas de transporte de sedimentos, para posterior comparação com os esquematizados para toda a Laguna.

Através de medições periódicas, é importante avaliar no local, a veracidade/realidade dos resultados obtidos.

Para um número reduzido de estações de estudo, preferencialmente na zona das marinhas e em situação de erosão, pode-se utilizar material de revestimento das margens e avaliar os mecanismos de transporte, depois da operação de protecção.

Seria importante estimar para as mesmas estações de estudo, os mecanismos calculados neste trabalho, mas através de outras expressões, tanto para sedimentos coesivos, como não-coesivos, comparando os resultados e discutindo qual a formulação mais adequada. Nesta fase, deveria ainda ser feita uma análise de sensibilidade às formulações e a todas as variáveis intervenientes nas expressões.

Sabendo que os mecanismos de transporte de sedimentos coesivos são dependentes de diversos fenómenos, apresentar as causas principais para existir deposição ou erosão, em cada uma das estações definidas como tendo predominância de sedimentos coesivos nas suas secções.

Por último, sugere-se a avaliação dos mecanismos estudados neste trabalho, nas mesmas estações, em mais dois pontos de cada secção (margens), visto que esta análise trabalha apenas com parâmetros de cálculo encontrados para um ponto central de cada secção.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A

Abrantes, M. I. R. R. (2005), Os sedimentos superficiais da margem continental, sector Espinho – Cabo Mondego: a utilização das fracções finas como traçadores de dinâmica sedimentar actual, PhD Thesis, Universidade de Aveiro, 239 p.

Alves, M. (2009), Mecanismos de Erosão e Deposição de Sedimentos Coesivos, PhD Thesis, Universidade de Aveiro, 61 p.

Araújo, M. A. V. C. (2004), Erosion Mechanisms In Marine Sediments, PhD Thesis, Universidade do Minho, 284 p.

Araújo, I. G. B. (2005), Sea Level Variability: Examples from the Atlantic Coast of Europe, PhD Thesis, Faculty of Science – School of Ocean & Earth Science, University of Southampton, 411 p.

C

Cardoso, A. H. (1998), Hidráulica Fluvial, Lisboa, Fundação Calouste Gulbenkian, 314 p.

Coelho, C., Cardoso, C. e Dias, J. M. (2008), Os Muros das Marinhas de Sal de Aveiro, Projecto Interreg SAL – Sal do Atlântico, Relatório Final, Universidade de Aveiro, 46 p.

Coelho, C., Facão, A., Rodrigues, P. e Silva, P. (2007), Comportamento Sedimentar na Embocadura da Barra de Aveiro, 23 p.

Costa, S. e Coelho, C. (2010), Suspended Sediment concentration importance on cohesive sediment settling velocity, Universidade de Aveiro, 12p (ainda não publicado).

D

Dias, J. M. (2001), Contribuição para o estudo da hidrodinâmica da Ria de Aveiro, PhD Thesis, Universidade de Aveiro, Portugal, 288 p.

F

Ferreira Gomes, L. M. e Ladeira F. L. (1989), Características geotécnicas dos lodos de Aveiro (nota prévia), Geociências, Revista da Universidade de Aveiro, Volume. 4, fas. 1, 39-44 p.

G

Gomes, L. M. F. (1992), Zonamento geotécnico da área urbana e suburbana de Aveiro, Tese de Doutoramento em Geologia da Engenharia, Universidade de Aveiro, Vol. 1, 531p.

H

Huang, J., Hildale, R. C. e Greimann, B. P. (2006), Erosion and Sedimentation Manual, U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation, Technical Service Center Sedimentation and River Hydraulics Group, Denver, Colorado.

J

JAPA (1989), Relatório de progressão, Hidroprojecto.

L

Lopes, J. F., Dias, J. M. e Dekeyser, I. (2001), Influence of tides and river inputs on suspended sediment transport in the Ria de Aveiro lagoon, Portugal, Physics and Chemistry of the Earth, HSA2 – 004, 5p.

Lopes, J. F., Dias, J. M. e Dekeyser, I. (2006), Numerical modelling of cohesive sediments transport in the Ria de Aveiro lagoon, Portugal, Journal of Hydrology, 176-198 p.

M

Maggi, F. (2005), Flocculation dynamics of cohesive sediment, PhD Thesis, Politecnico di Torino, Italia, 139p.

Marinheiro, J. (2008), Assoreamento da Ria de Aveiro. Causas e Soluções, PhD Thesis, Universidade de Aveiro, 145 p.

Mingxiao, X. W. Z. W. G. (2010), A validation concept for cohesive sediment transport model and application on Lianyungang Harbor, China, Coastal Engineering 57, 585-596 p.

P

Picado, A. (2008), Degradação das marinhas de sal na Ria de Aveiro: Estudo Hidrodinâmico, PhD Thesis, Universidade de Aveiro, 50 p.

Português, C. (2008), Programação de Modelos de Transporte Sedimentar Comparação de Soluções, PhD Thesis, Universidade de Aveiro, 73 p.

T

Trento, A. E. (2005), Dinâmica da Floculação no Transporte de Sedimentos Finos, PhD Thesis, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, 170 p.

[1]

Fernandes, L., Modelação do transporte de sedimentos e de processos biogeoquímicos nos sedimentos, Maretec, IST, 21 diapositivos, www.mod-ambiental.mohid.com/Sedimentos.pps (consultado em Junho de 2010).

ANEXOS

Anexo A – Massas específicas dos materiais.▪ Materiais Soltos

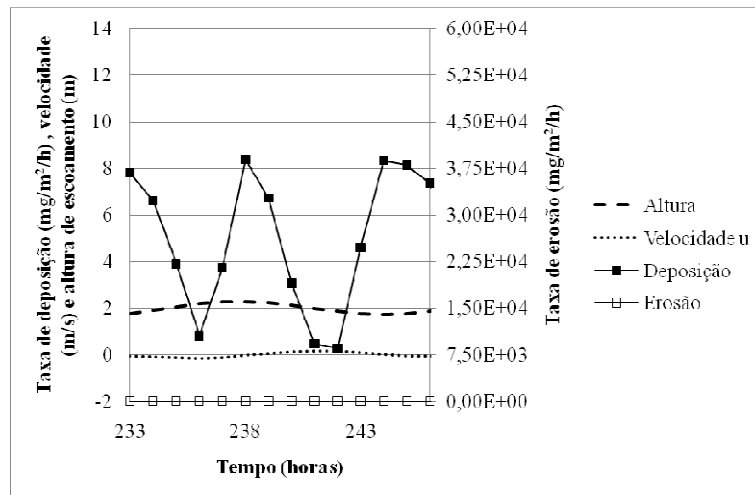
Material	kg/m³
Areia seca	1300 a 1600
Areia húmida	1700 a 2300
Areia fina seca	1500
Areia grossa seca	1800
Argila seca	1600 a 1800
Argila húmida	1800 a 2100
Terra apiloadada seca	1000 a 1600
Terra apiloadada húmida	1600 a 2000
Terra arenosa	1700
Terra vegetal seca	1200 a 1300
Terra vegetal húmida	1600 a 1800

Anexo B – Tabela representativa dos valores do ELCIRC.

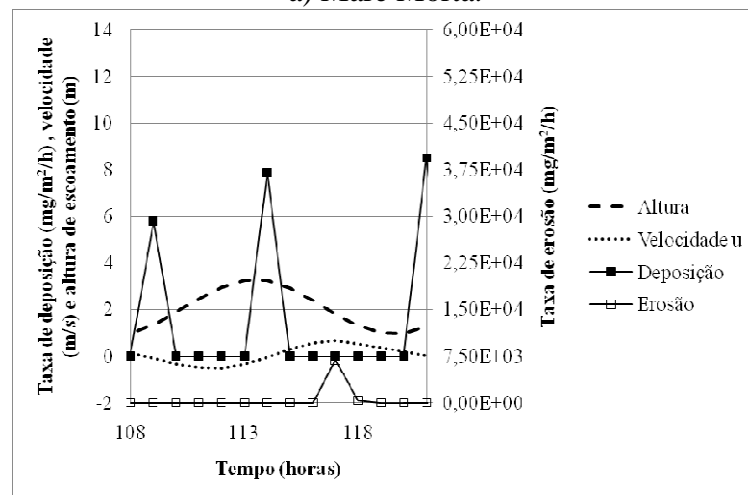
Estação	h máx.	h mín.	h média	Velocidade máxima	Sentido	Velocidade média	Sentido
E1	21,58	18,60	20,09	-2,06	V	-0,0091	V
E2	4,14	0,93	2,54	-0,88	V	-0,0144	V
E3	2,84	-0,40	1,15	1,78	E	-0,0762	V
E4	7,51	4,39	5,98	-0,93	V	-0,0120	V
E5	4,60	1,42	3,03	-0,63	V	-0,0133	V
E6	3,71	0,34	2,05	1,11	E	0,0572	E
E7	1,88	-0,43	0,81	0,16	E	-0,0038	V
E8	1,48	-0,86	-0,32	0,27	E	0,0461	E
E9	1,95	0,64	1,20	0,06	V	0,0000	V
E10	2,57	1,28	1,83	0,21	V	-0,0003	E
E11	2,44	-0,16	0,97	0,28	E	-0,0012	V
E12	3,53	0,84	2,06	0,28	E	0,0061	E
E13	1,95	-0,97	0,33	0,36	E	-0,0022	V
E14	2,45	-1,18	0,51	-1,39	V	0,0376	E
E15	2,75	-0,23	1,09	0,96	E	-0,0096	V
E16	5,20	1,69	3,42	0,42	E	-0,0114	V
E17	6,28	2,69	4,51	-2,01	V	-0,0577	V
E18	3,57	-5,05	-0,01	0,7	V	-0,0051	E
E19	6,35	3,57	4,65	-0,71	E	0,0089	V
E20	2,19	0,37	1,11	-0,44	E	-0,0033	E
E21	4,22	0,15	2,00	0,43	V	0,0152	V
E22	12,34	9,15	10,76	0,4	V	0,0042	V
E23	2,96	-0,55	0,86	0,83	E	-0,0057	V
E24	5,22	1,99	3,63	0,88	E	0,0048	E
E25	7,03	3,72	5,41	-0,73	V	-0,0141	V
E26	3,50	0,18	1,88	0,3	V	0,0055	V
E27	3,28	-1,17	0,85	-0,73	V	-0,0077	V
E28	7,65	4,31	6,02	0,71	V	-0,0084	E
E29	2,35	-0,55	0,47	-0,52	V	0,0037	E
E30	5,64	2,05	3,89	0,4	V	-0,0034	E

O sentido do escoamento em vazante representa-se por V e em enchente E.

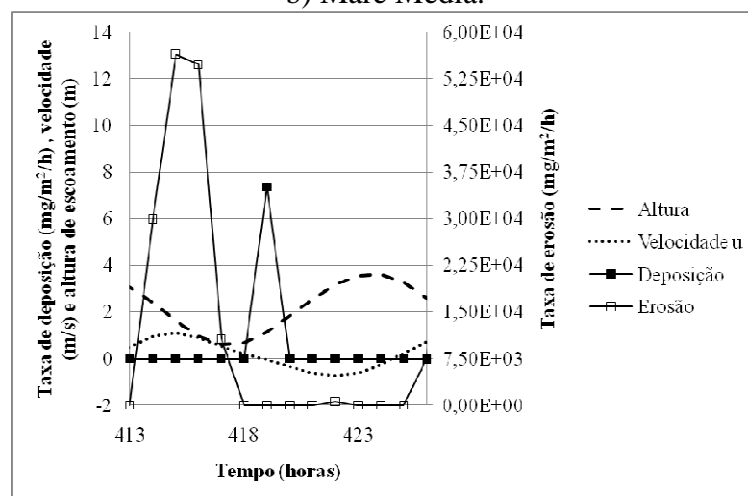
Anexo C – Gráficos de sedimentos coesivos



a) Maré Morta.

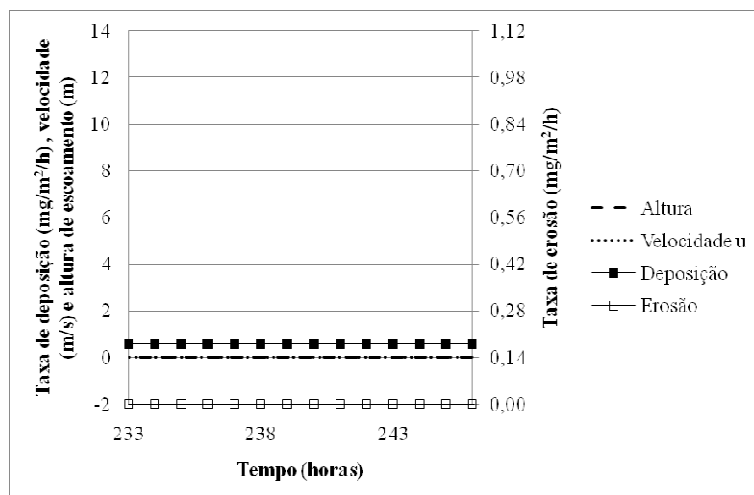


b) Maré Média.

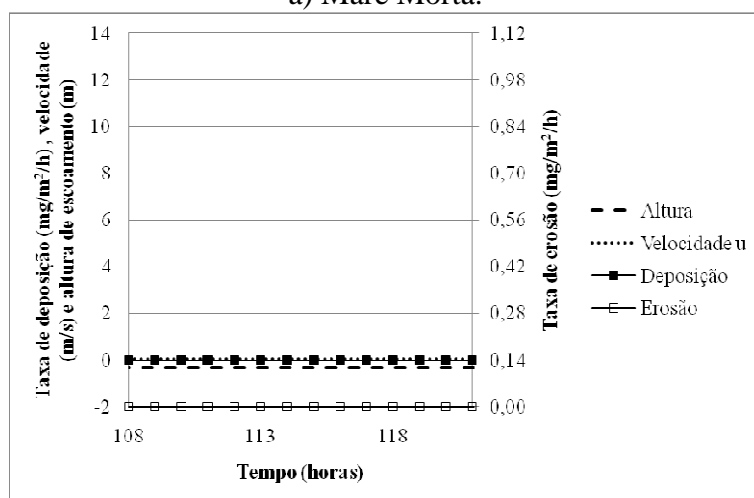


c) Maré Viva.

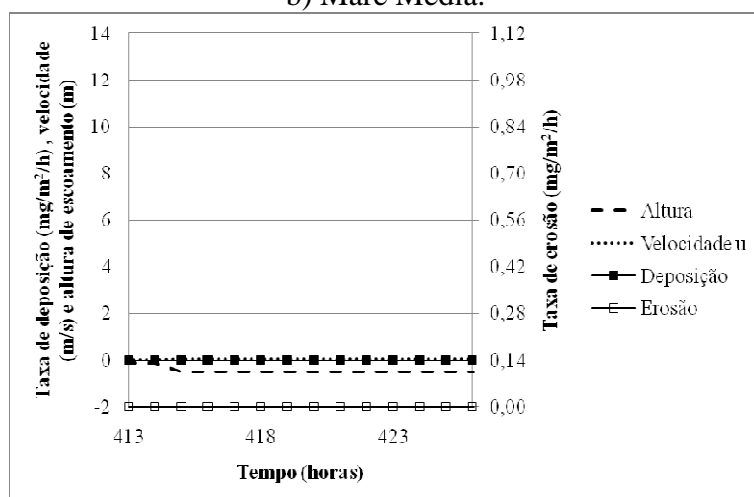
Figura C1: Taxas de deposição e erosão, altura e velocidade de escoamento na E6.



a) Maré Morta.

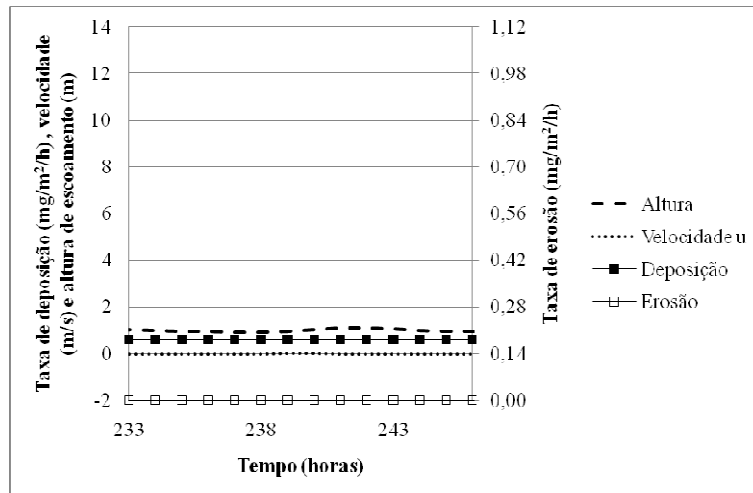


b) Maré Média.

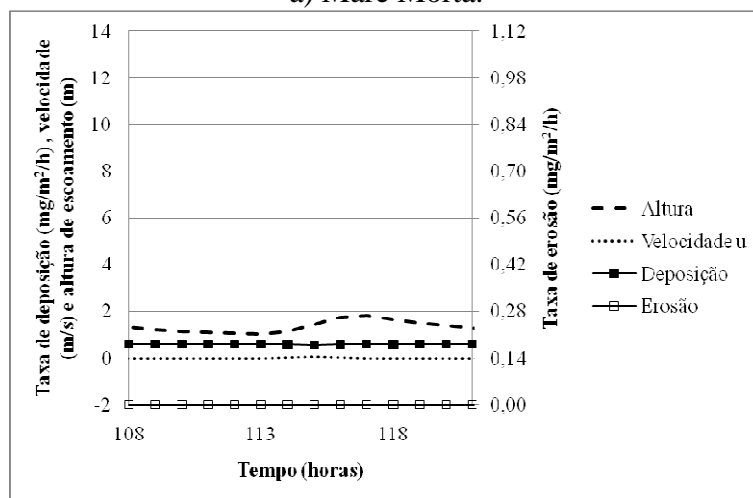


c) Maré Viva.

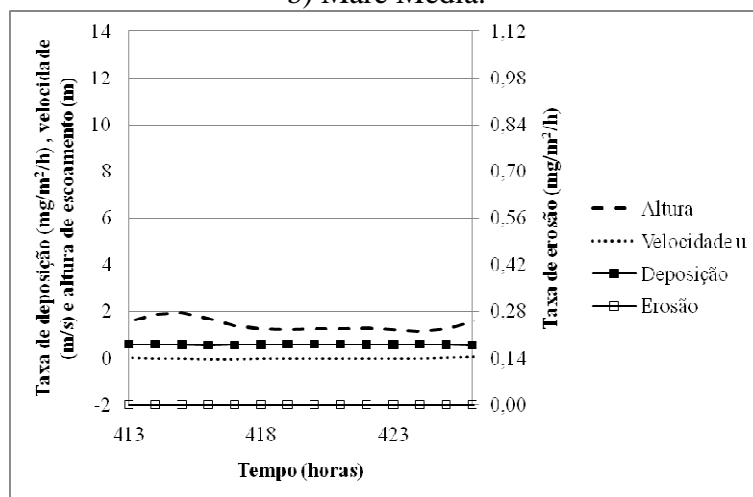
Figura C2: Taxas de deposição e erosão, altura e velocidade de escoamento na E8.



a) Maré Morta.

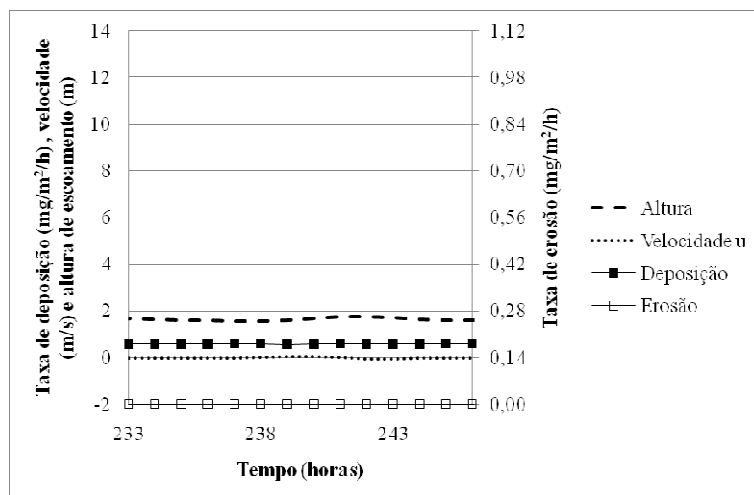


b) Maré Média.

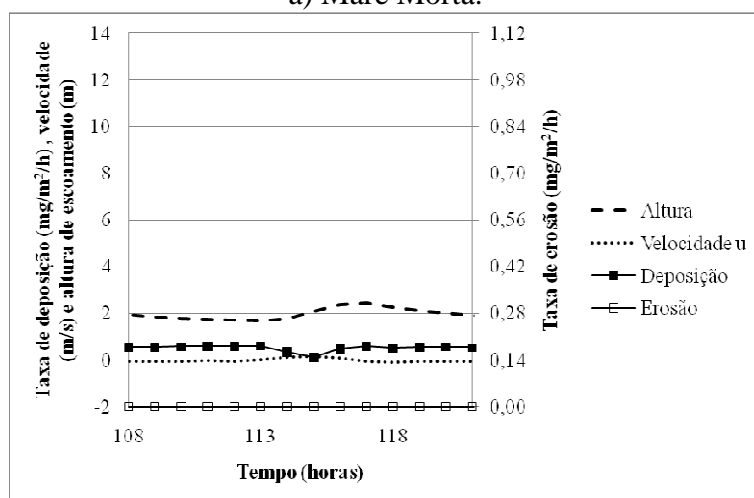


c) Maré Viva.

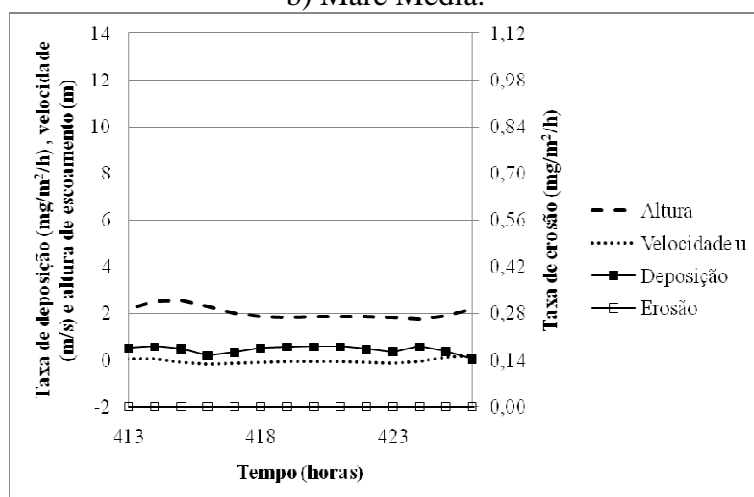
Figura C3: Taxas de deposição e erosão, altura e velocidade de escoamento na E9.



a) Maré Morta.

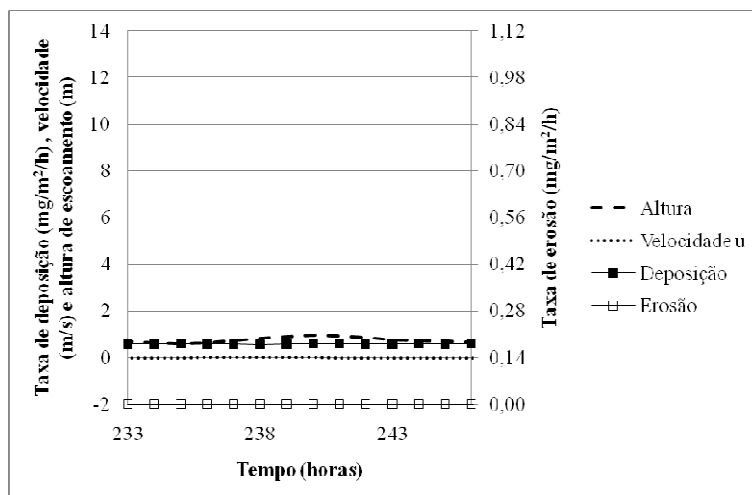


b) Maré Média.

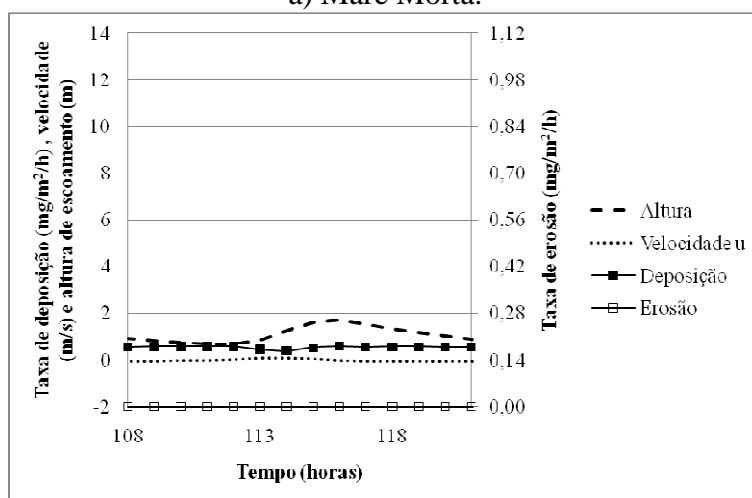


c) Maré Viva.

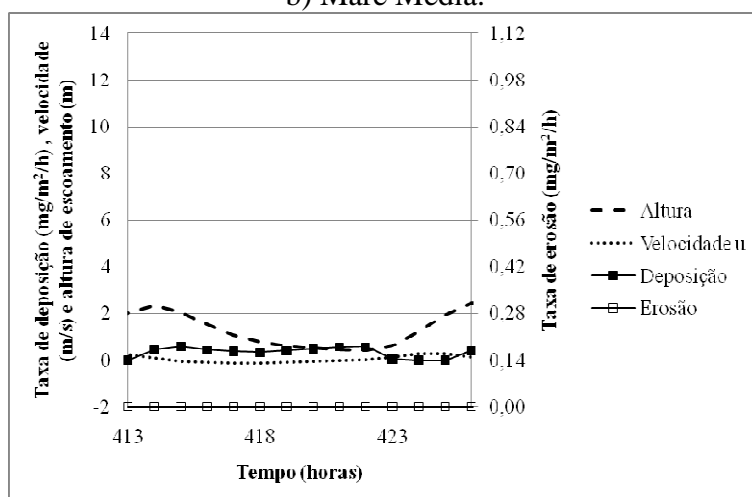
Figura C4: Taxas de deposição e erosão, altura e velocidade de escoamento na E10.



a) Maré Morta.

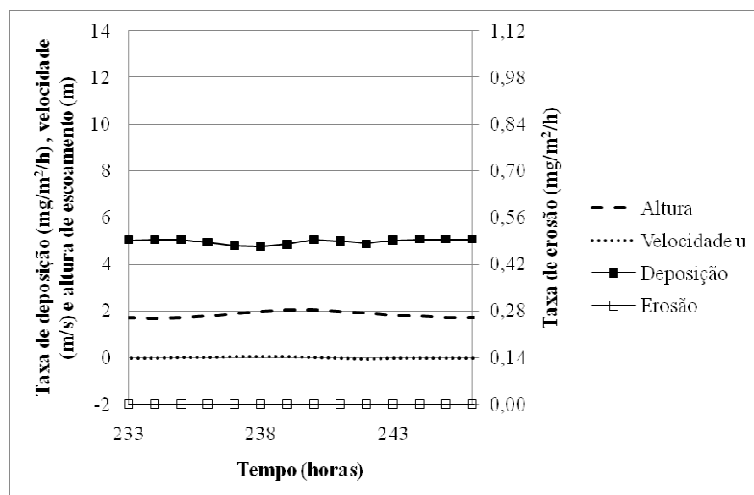


b) Maré Média.

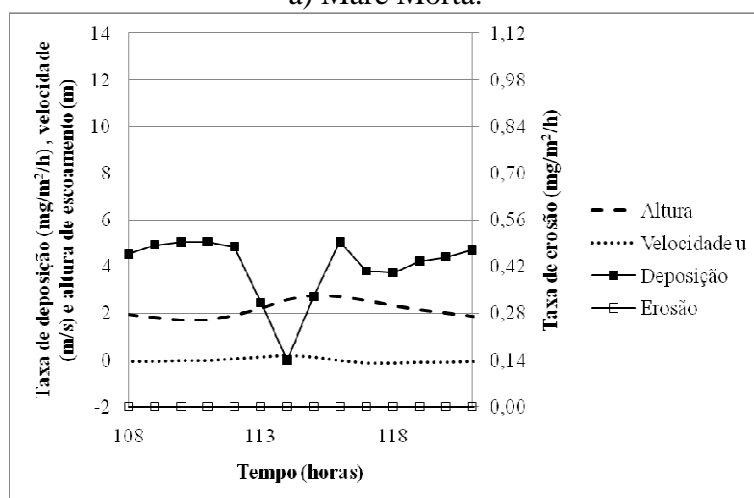


c) Maré Viva.

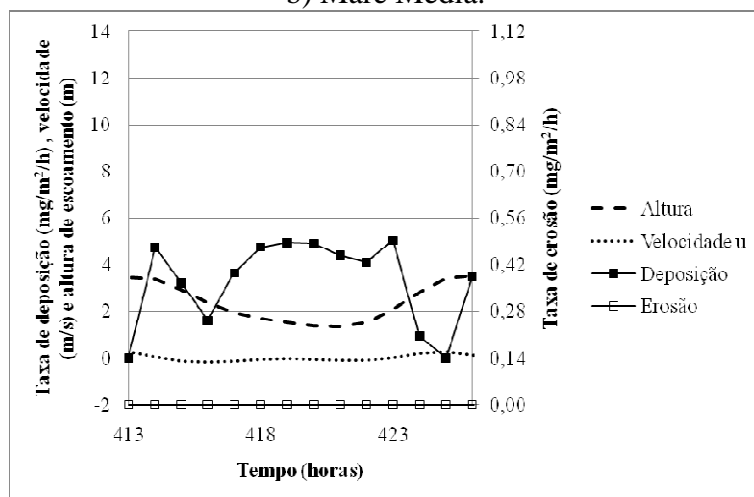
Figura C5: Taxas de deposição e erosão, altura e velocidade de escoamento na E11.



a) Maré Morta.

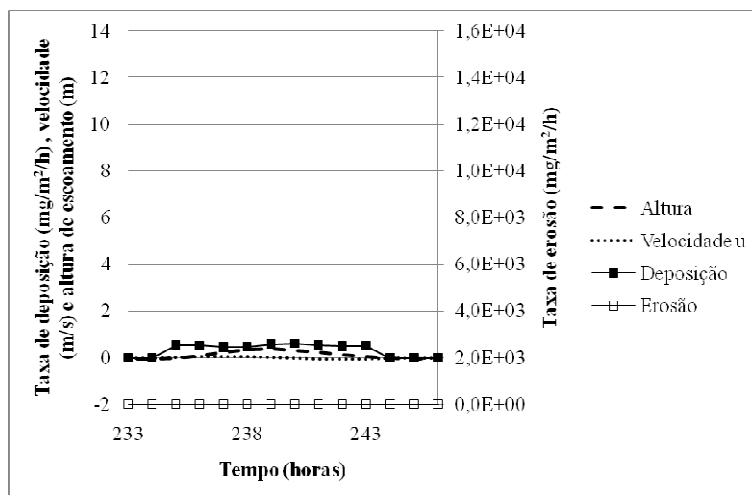


b) Maré Média.

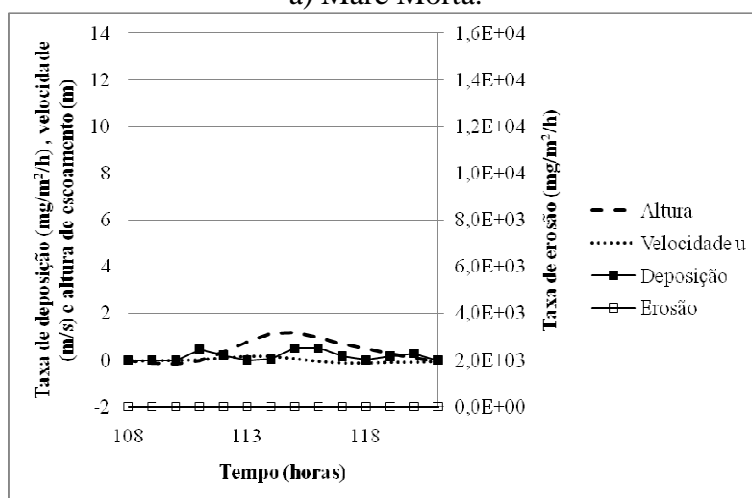


c) Maré Viva.

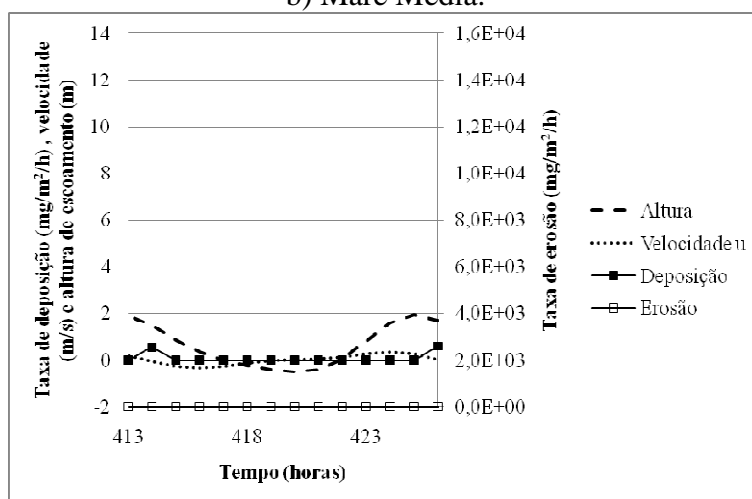
Figura C6: Taxas de deposição e erosão, altura e velocidade de escoamento na E12.



a) Maré Morta.

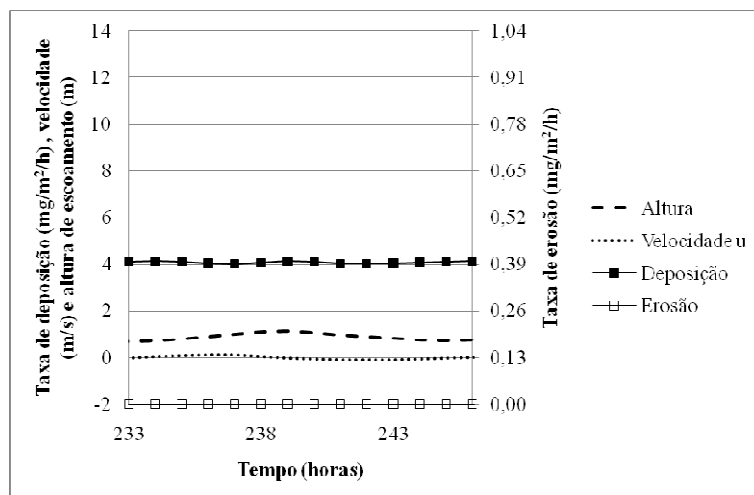


b) Maré Média.

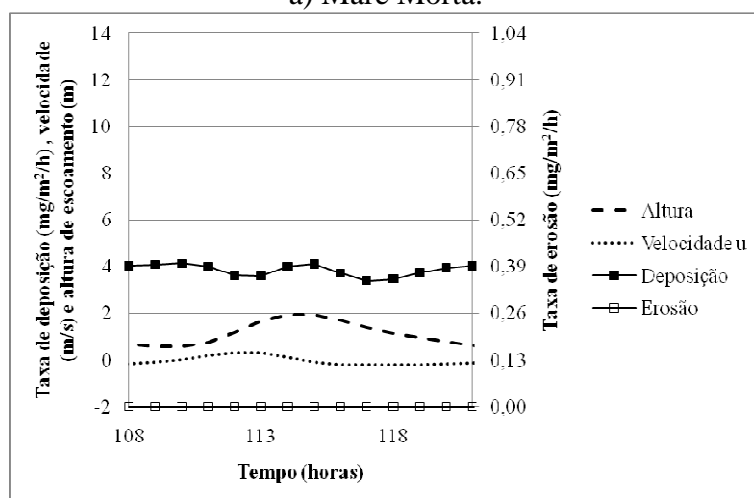


c) Maré Viva.

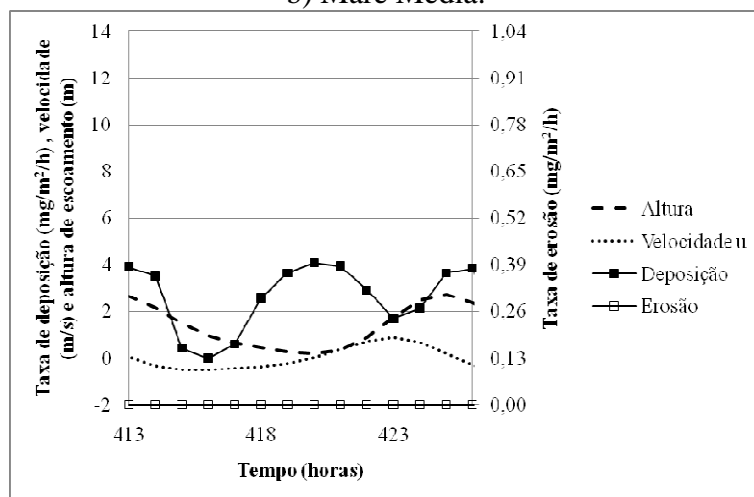
Figura C7: Taxas de deposição e erosão, altura e velocidade de escoamento na E13.



a) Maré Morta.

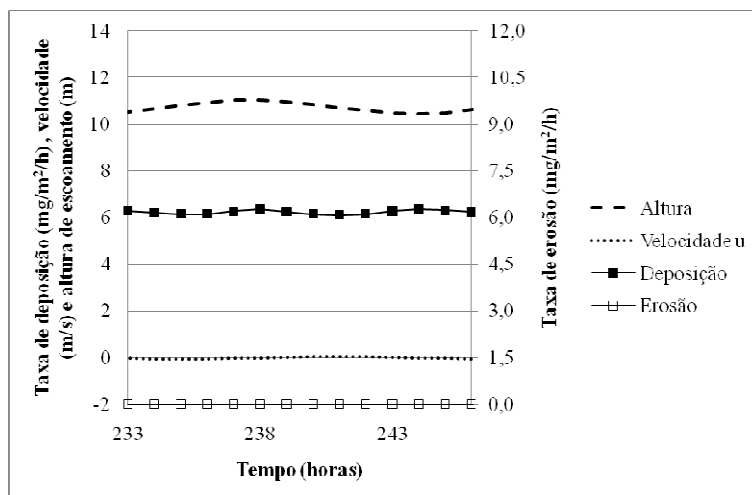


b) Maré Média.

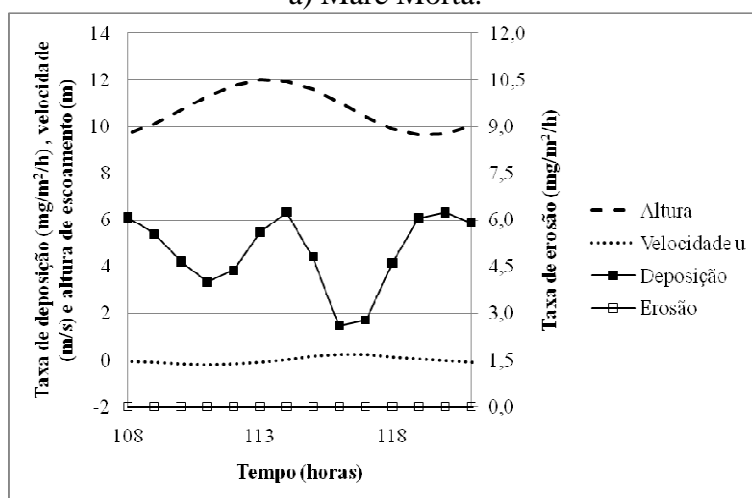


c) Maré Viva.

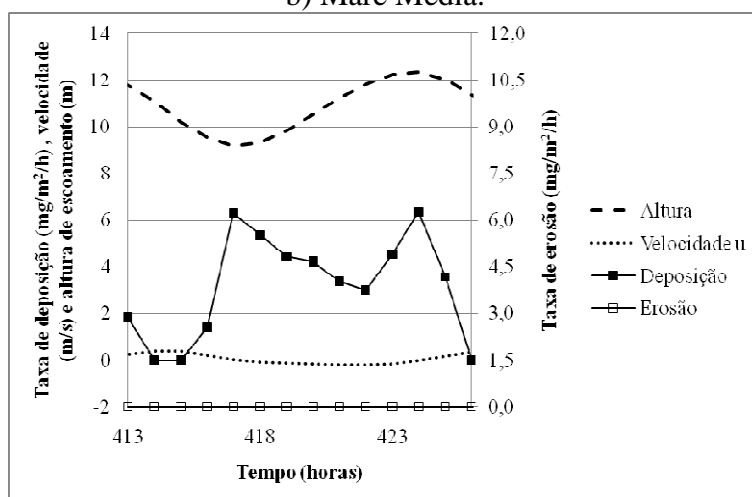
Figura C8: Taxas de deposição e erosão, altura e velocidade de escoamento na E15.



a) Maré Morta.

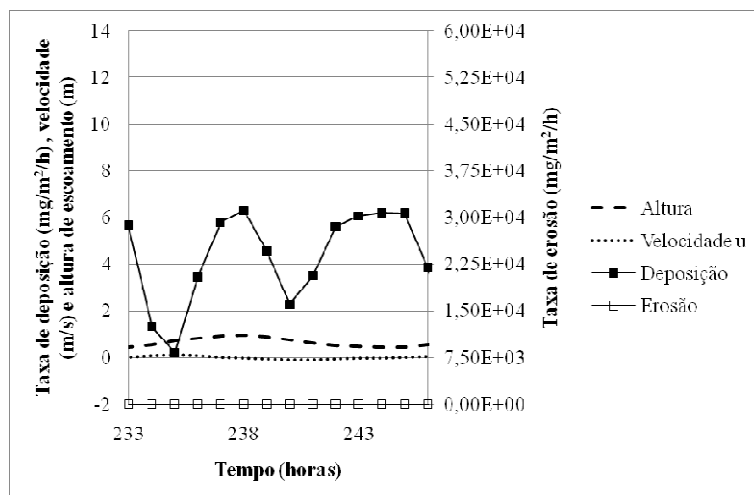


b) Maré Média.

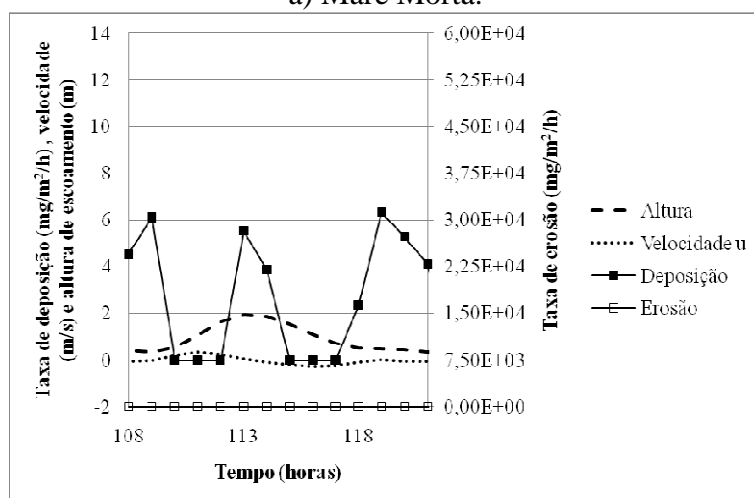


c) Maré Viva.

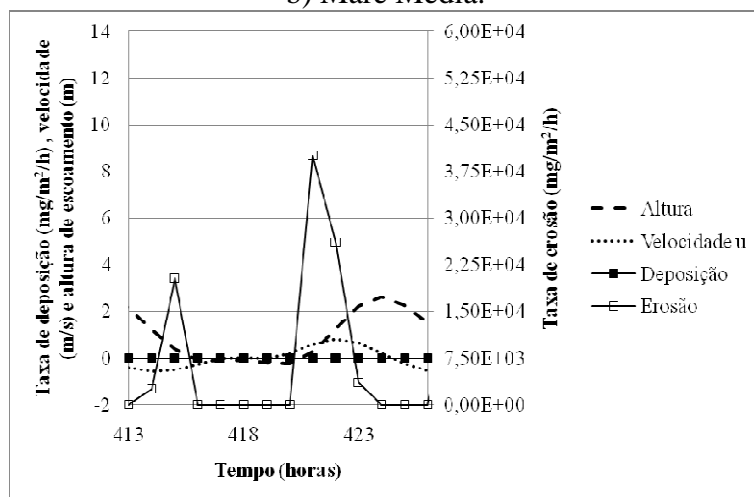
Figura C9: Taxas de deposição e erosão, altura e velocidade de escoamento na E22.



a) Maré Morta.

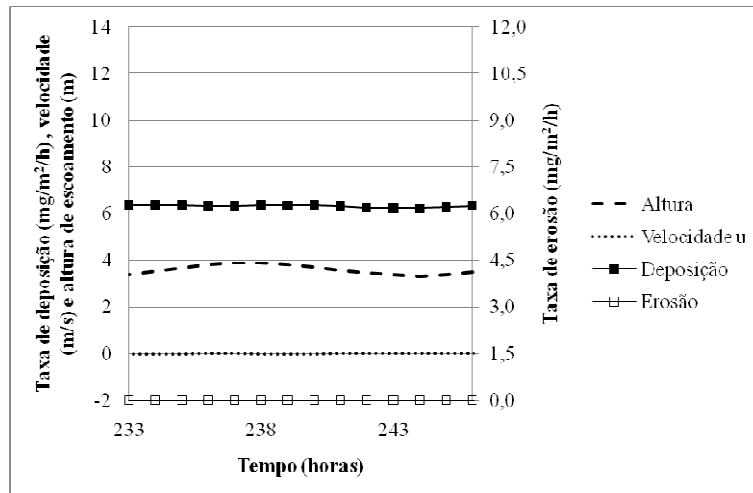


b) Maré Média.

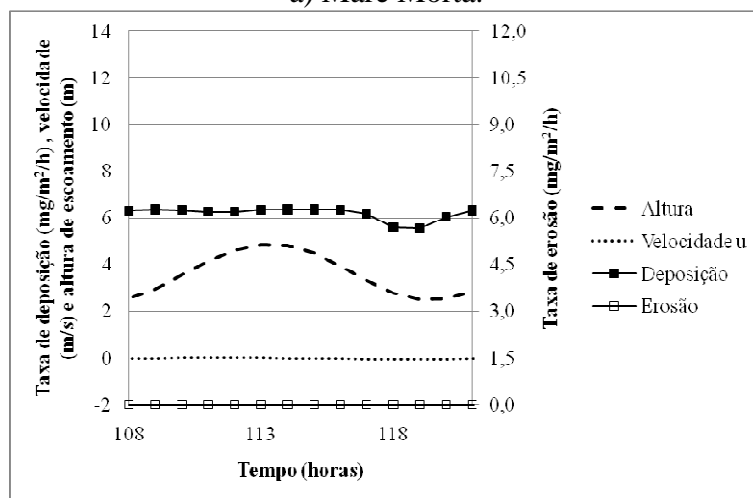


c) Maré Viva.

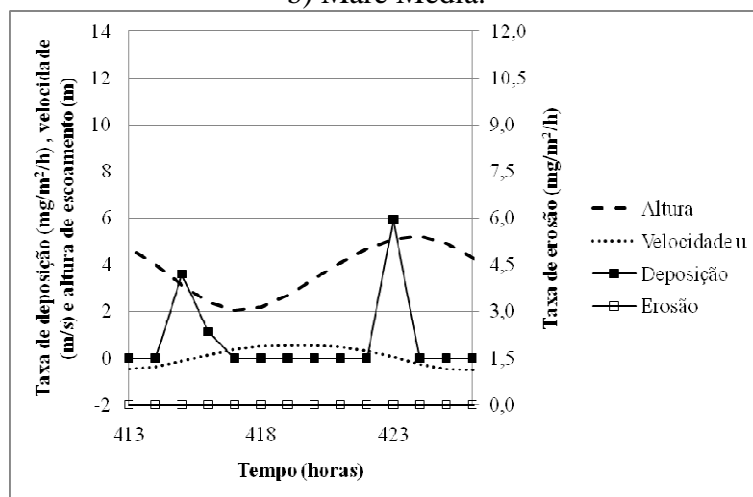
Figura C10: Taxas de deposição e erosão, altura e velocidade de escoamento na E23.



a) Maré Morta.

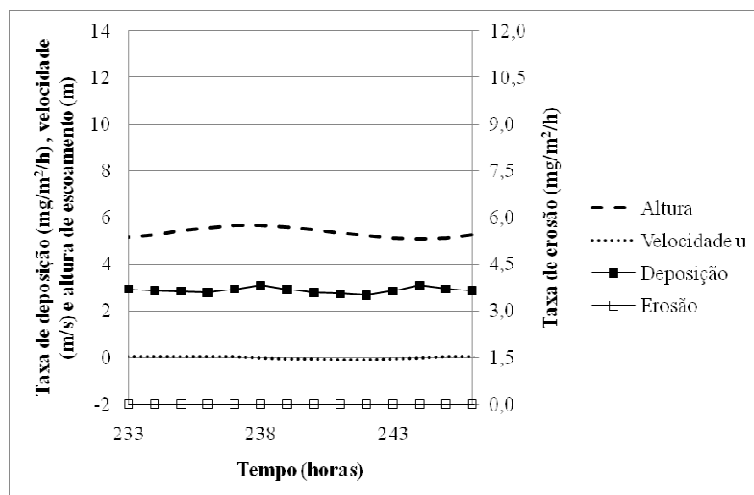


b) Maré Média.

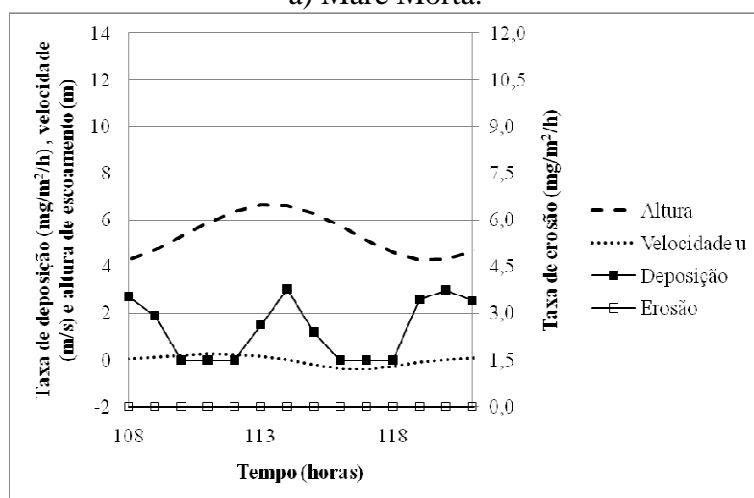


c) Maré Viva.

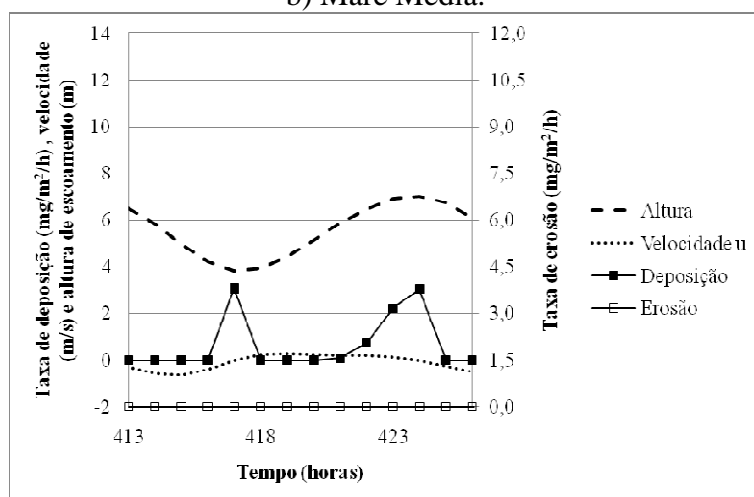
Figura C11: Taxas de deposição e erosão, altura e velocidade de escoamento na E24.



a) Maré Morta.

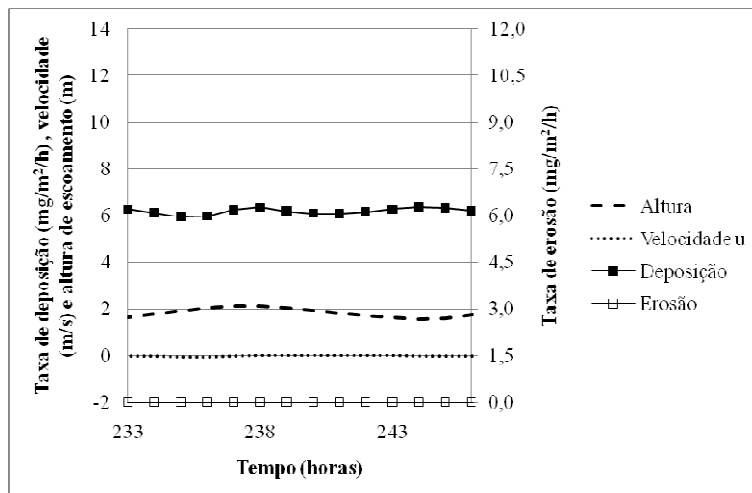


b) Maré Média.

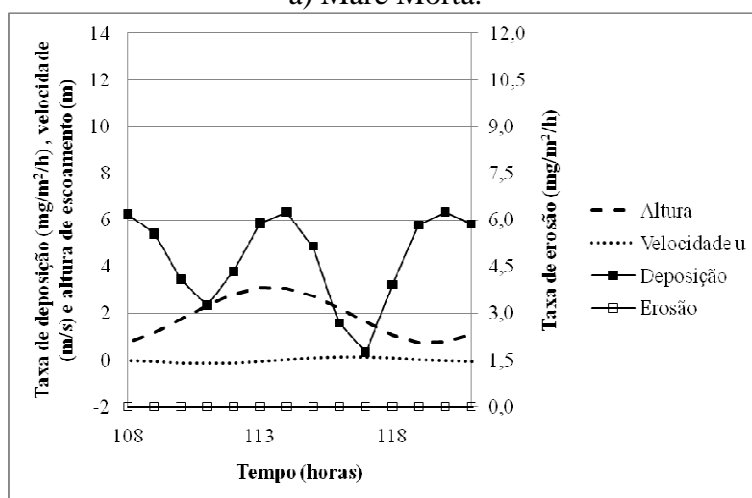


c) Maré Viva.

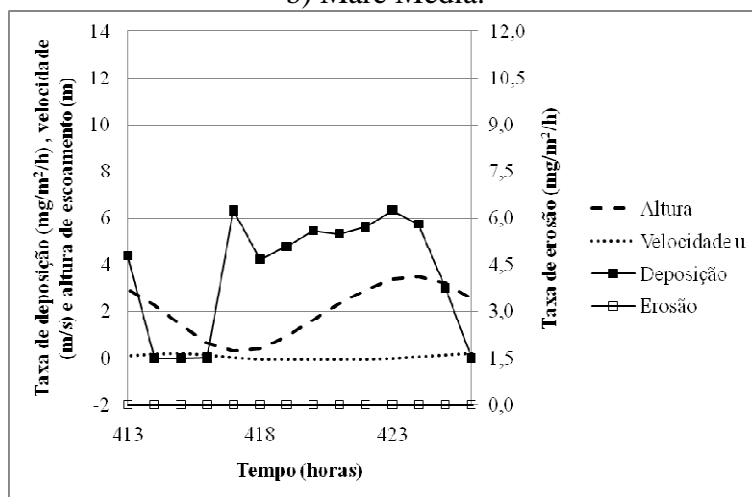
Figura C12: Taxas de deposição e erosão, altura e velocidade de escoamento na E25.



a) Maré Morta.

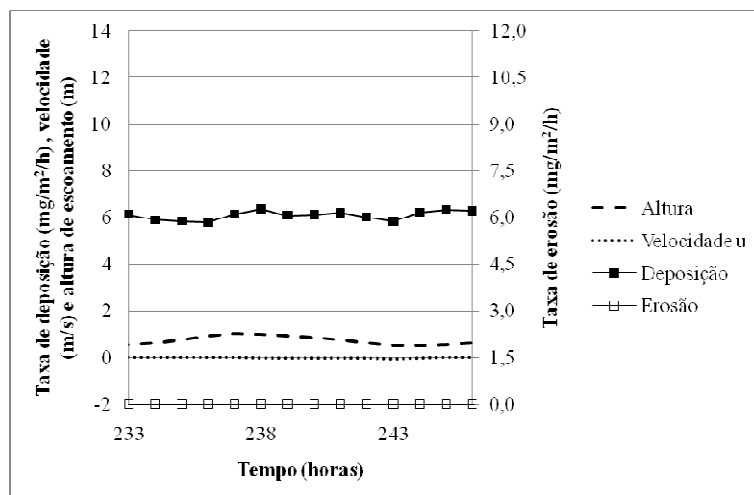


b) Maré Média.

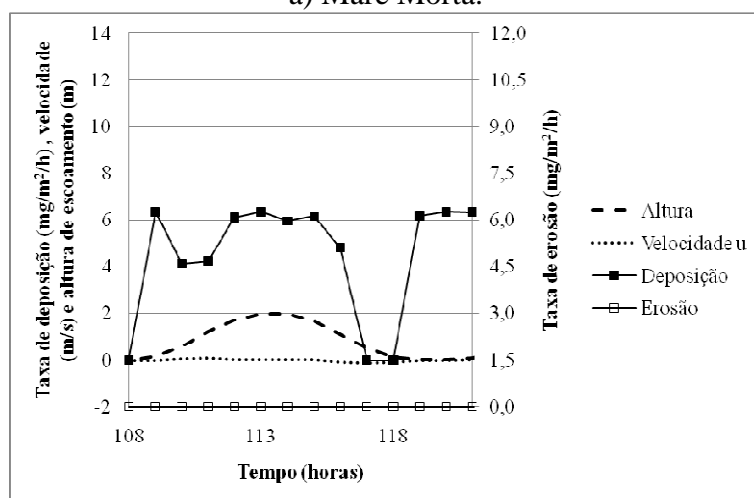


c) Maré Viva.

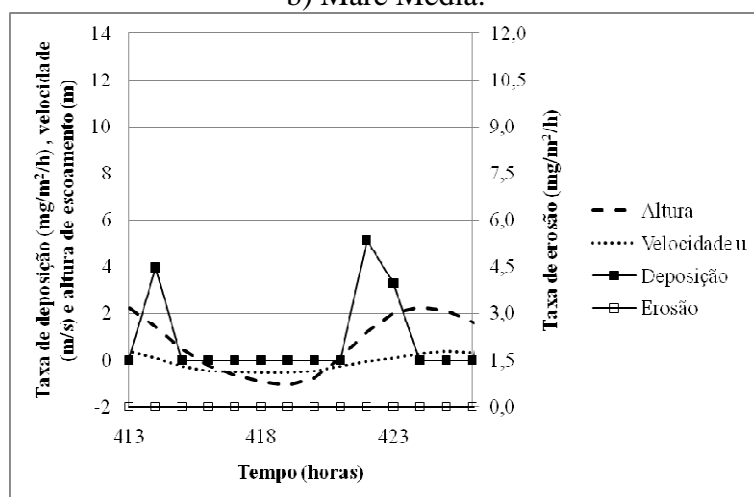
Figura C13: Taxas de deposição e erosão, altura e velocidade de escoamento na E26.



a) Maré Morta.

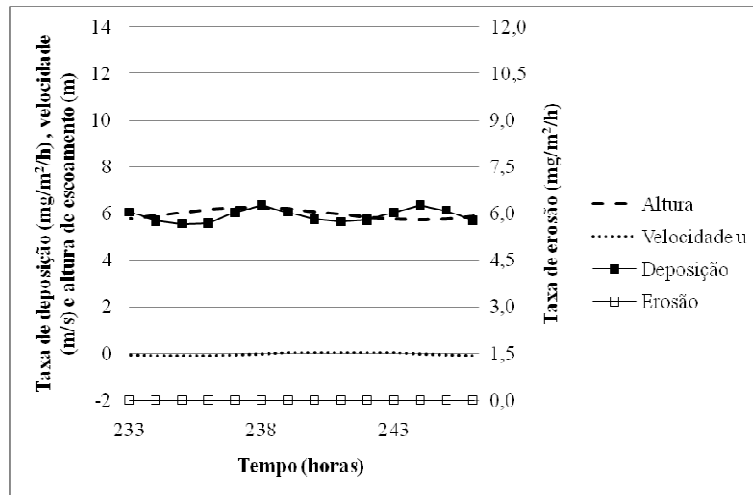


b) Maré Média.

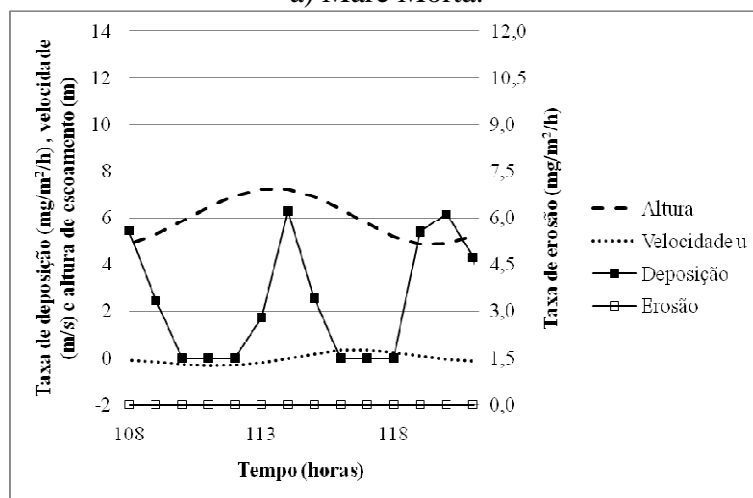


c) Maré Viva.

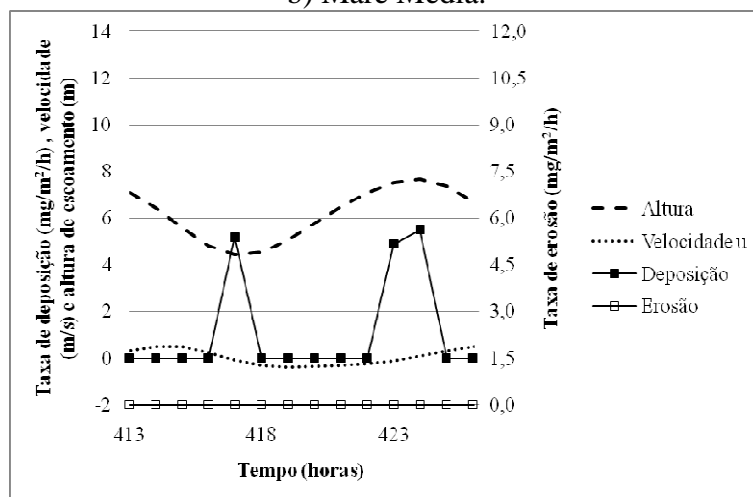
Figura C14: Taxas de deposição e erosão, altura e velocidade de escoamento na E27.



a) Maré Morta.

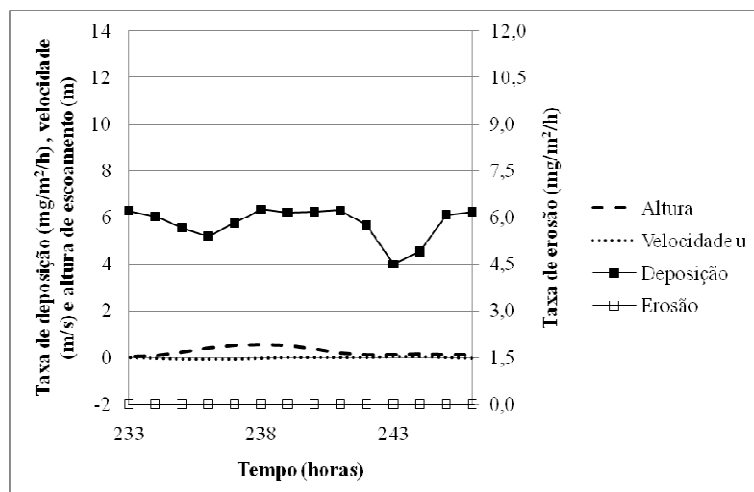


b) Maré Média.

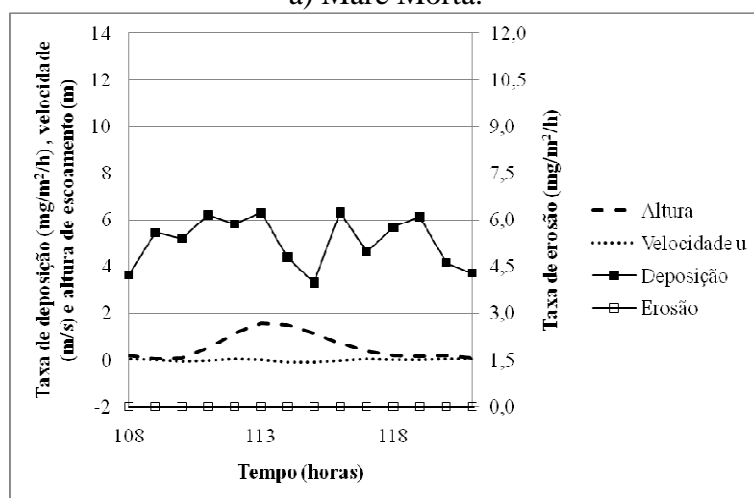


c) Maré Viva.

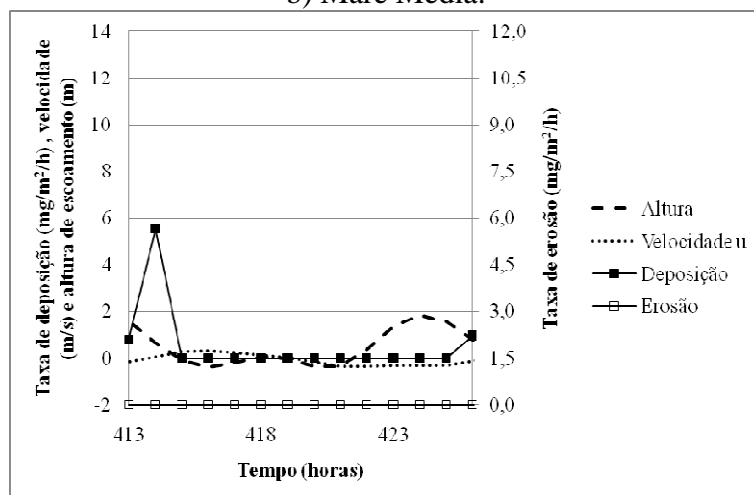
Figura C15: Taxas de deposição e erosão, altura e velocidade de escoamento na E28.



a) Maré Morta.

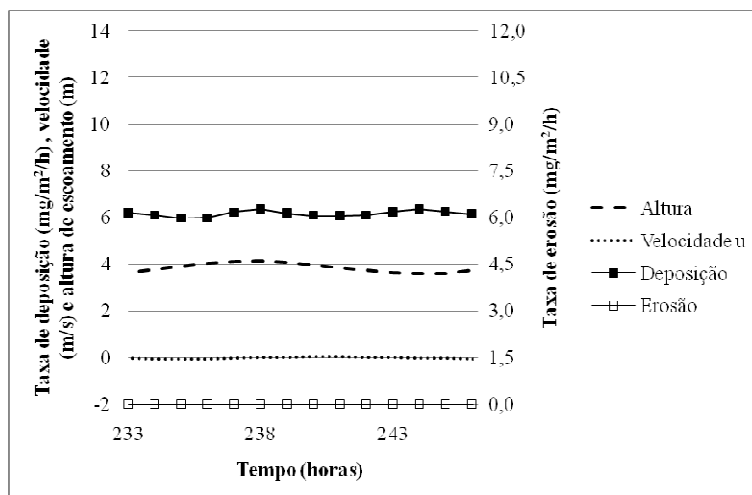


b) Maré Média.

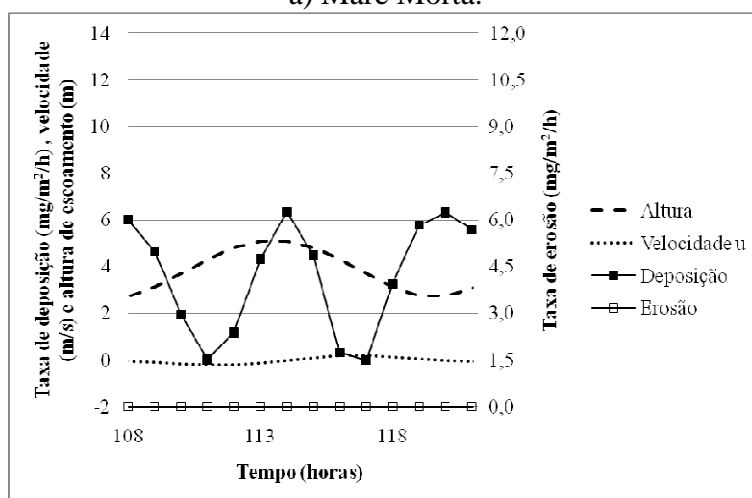


c) Maré Viva.

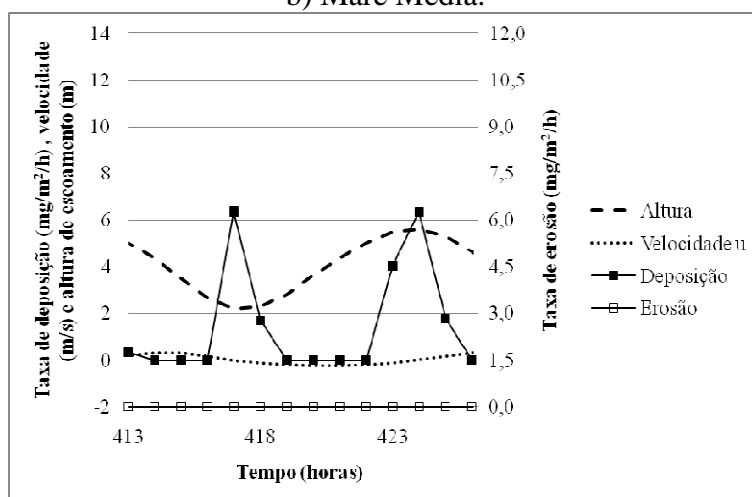
Figura C16: Taxas de deposição e erosão, altura e velocidade de escoamento na E29.



a) Maré Morta.



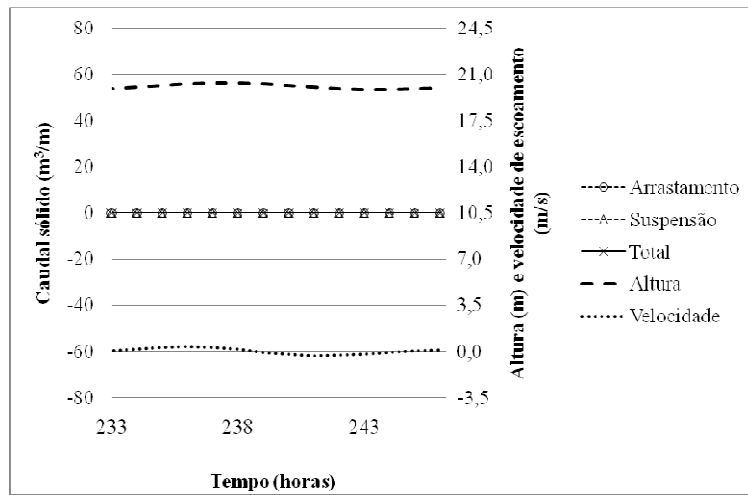
b) Maré Média.



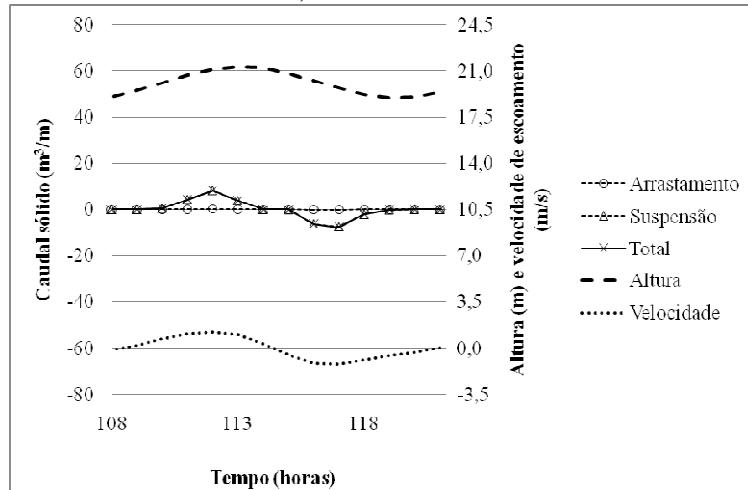
c) Maré Viva.

Figura C17: Taxas de deposição e erosão, altura e velocidade de escoamento na E30.

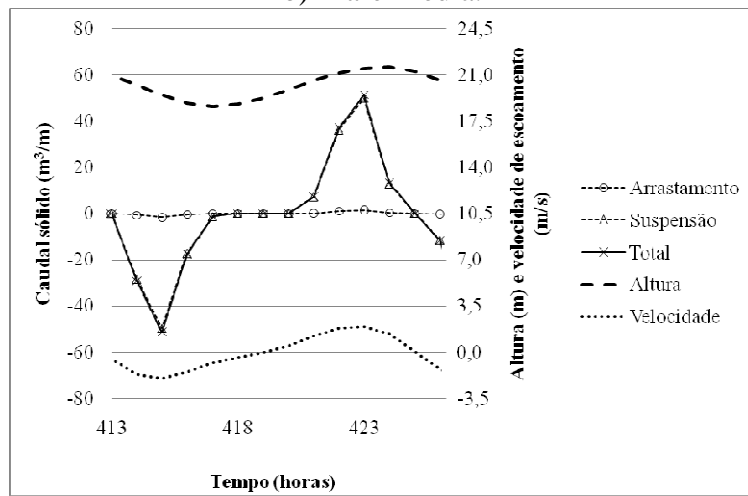
Anexo D – Gráficos de sedimentos não-coesivos



a) Maré Morta.

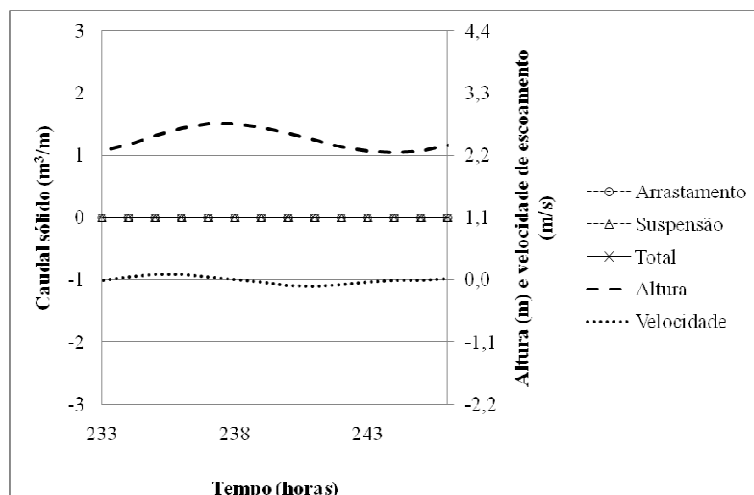


b) Maré Média.

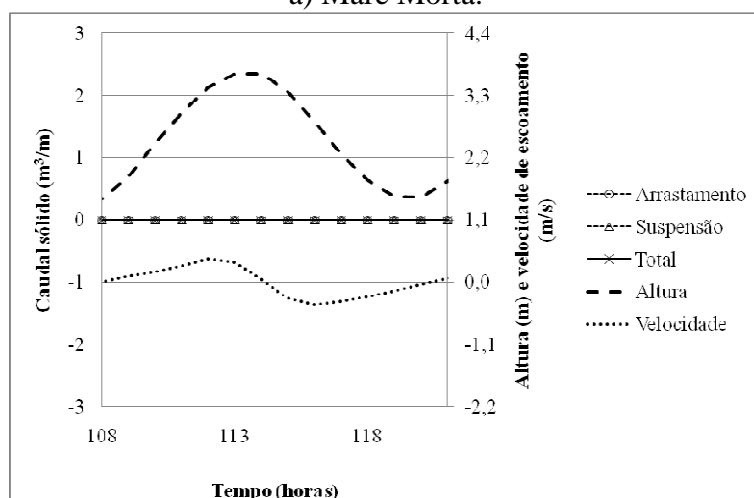


c) Maré Viva.

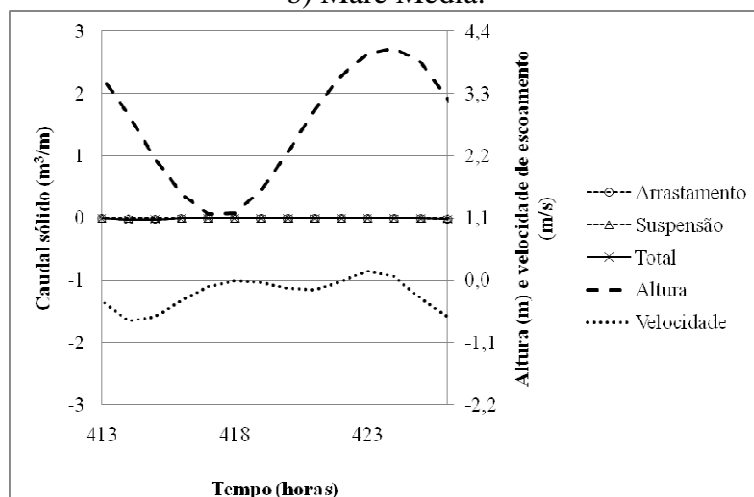
Figura D1: Variação do caudal sólido, altura e velocidade de escoamento na E1.



a) Maré Morta.

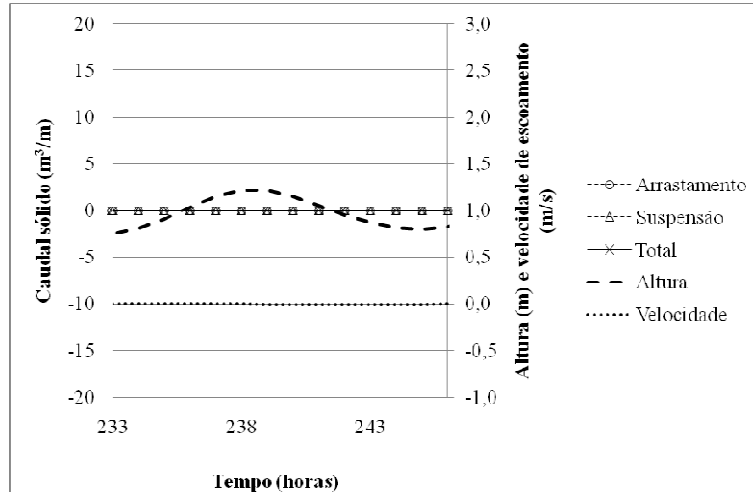


b) Maré Média.

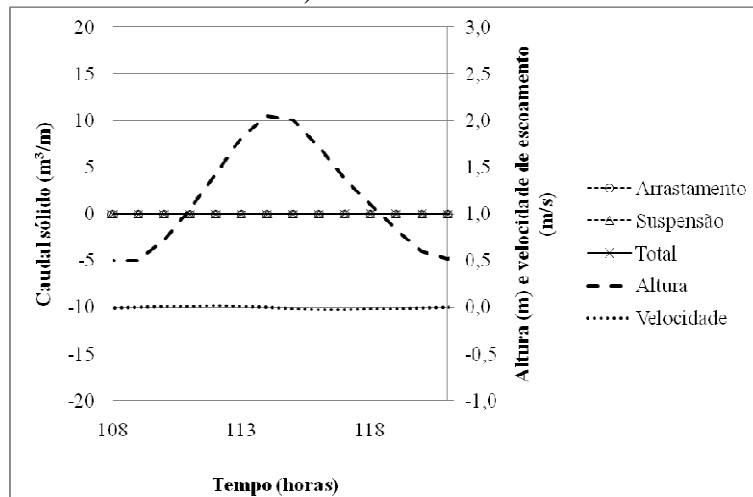


c) Maré Viva.

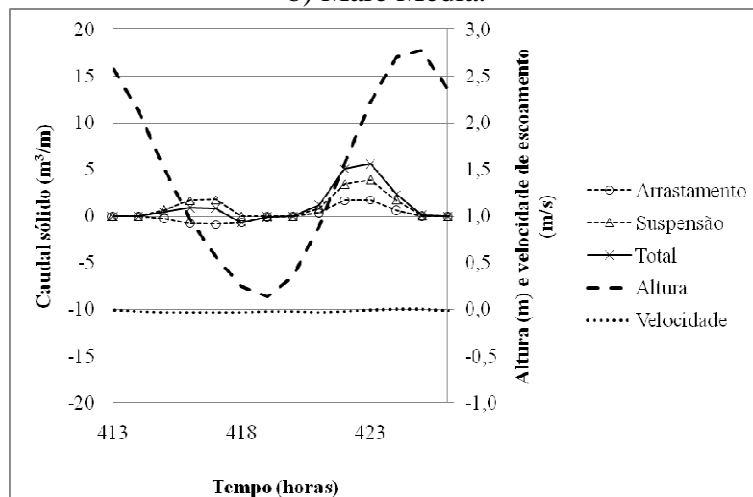
Figura D2: Variação do caudal sólido, altura e velocidade de escoamento na E2.



a) Maré Morta.

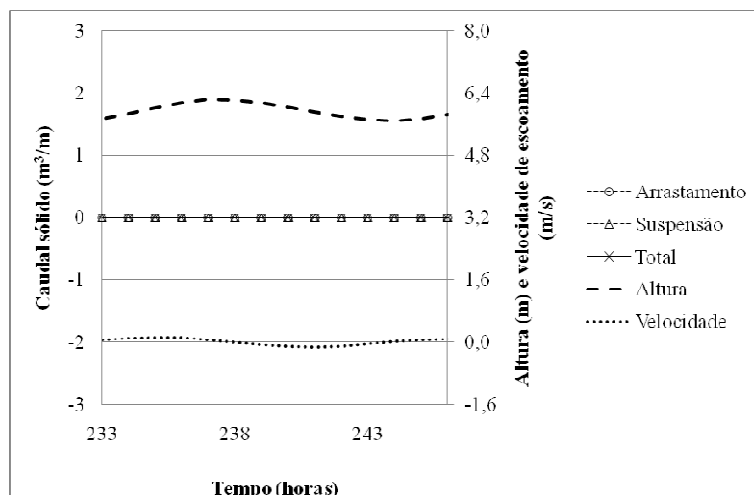


b) Maré Média.

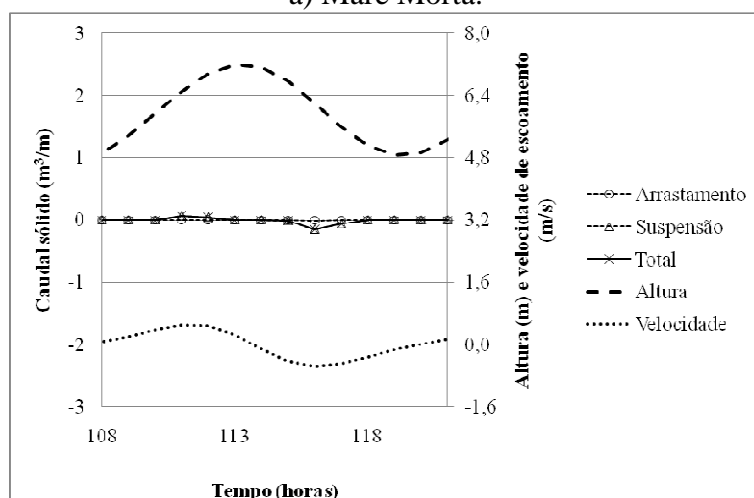


c) Maré Viva.

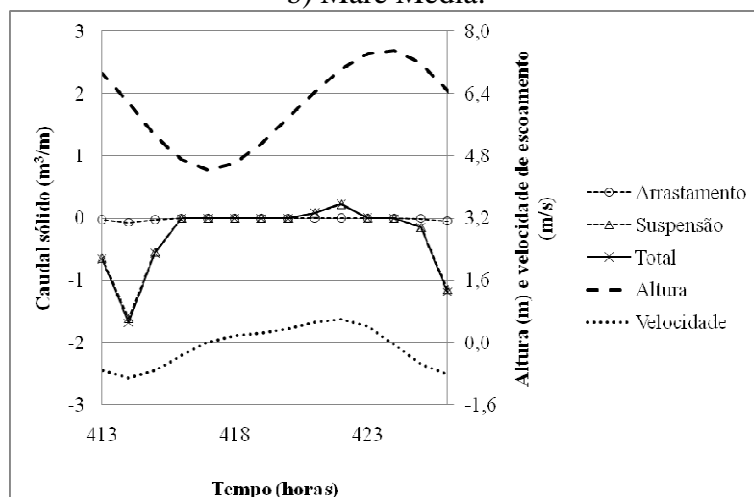
Figura D3: Variação do caudal sólido, altura e velocidade de escoamento na E3.



a) Maré Morta.

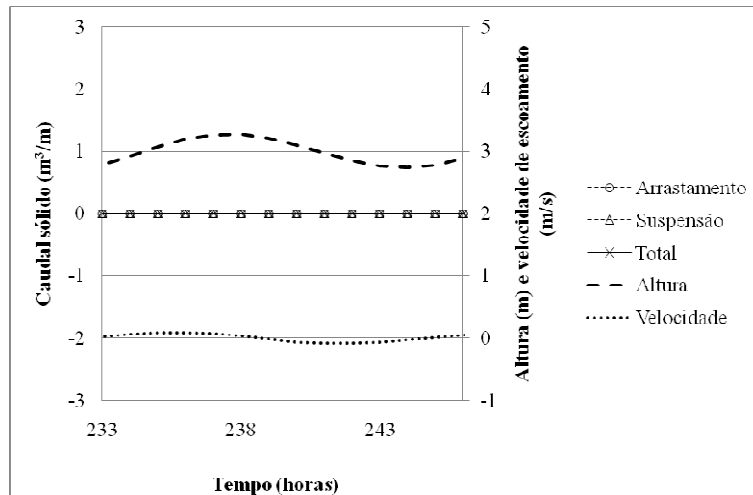


b) Maré Média.

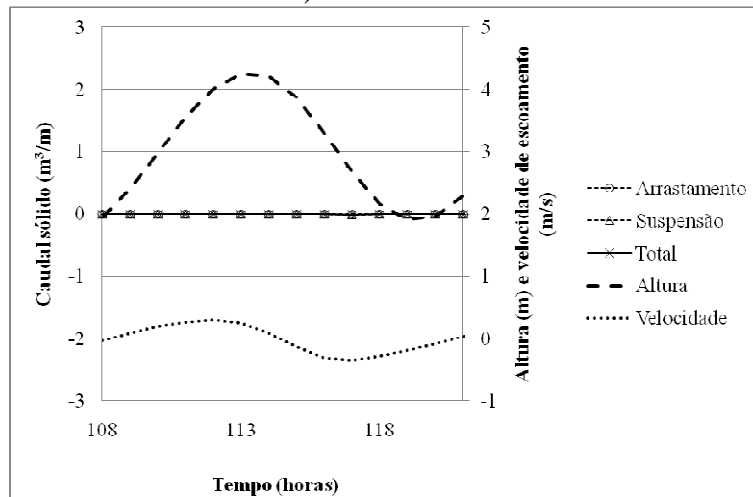


c) Maré Viva.

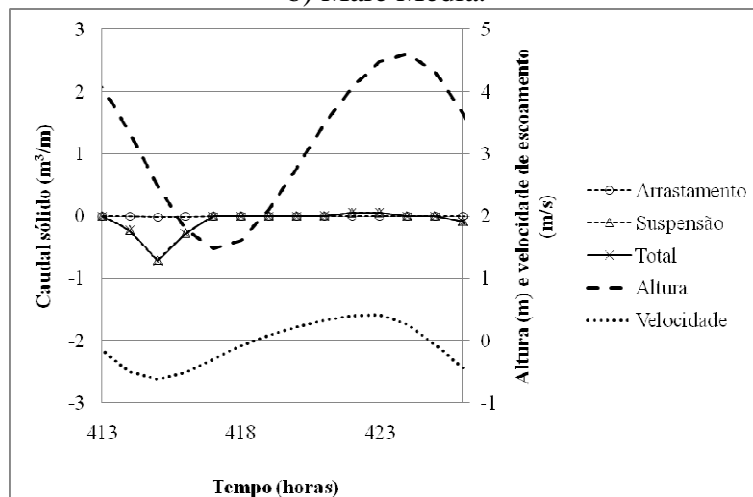
Figura D4: Variação do caudal sólido, altura e velocidade de escoamento na E4.



a) Maré Morta.

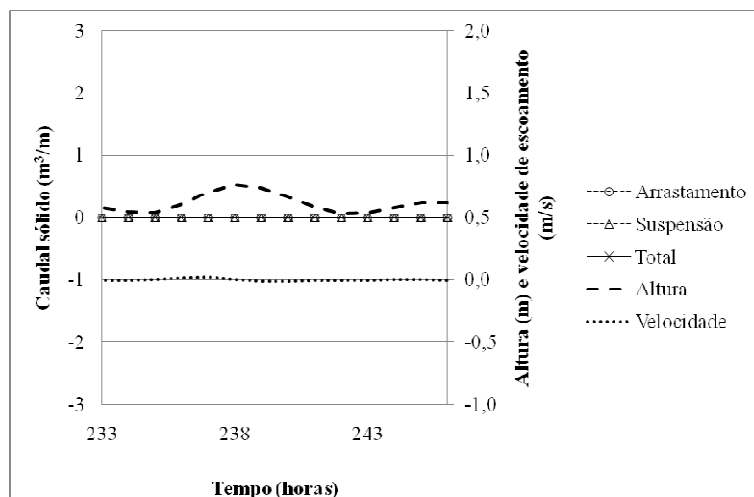


b) Maré Média.

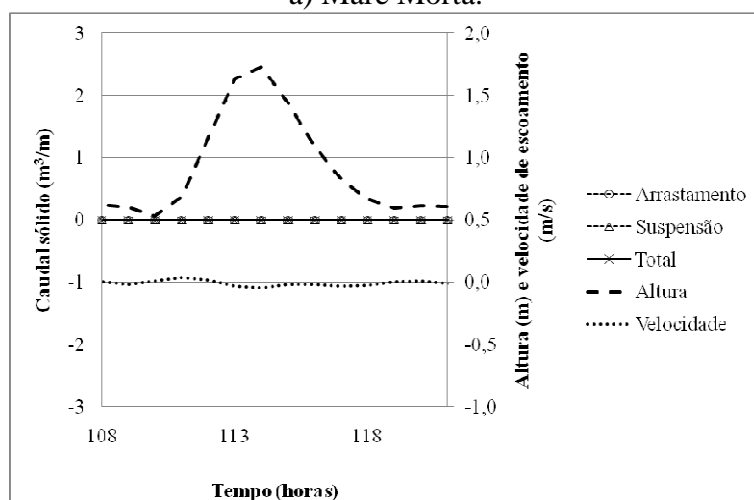


c) Maré Viva.

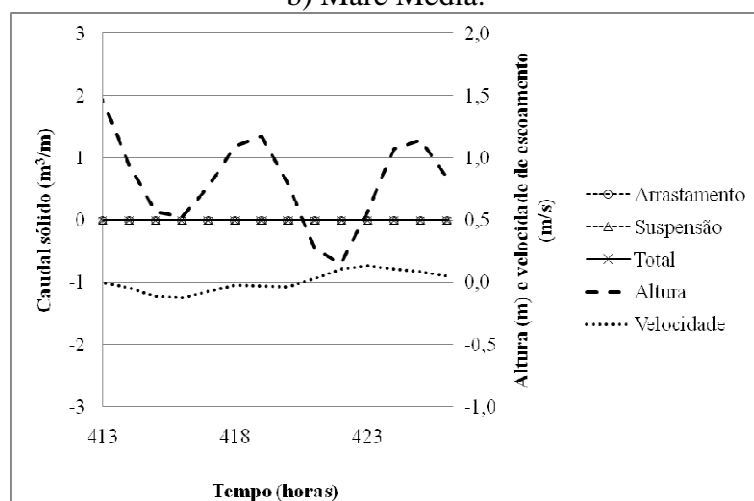
Figura D5: Variação do caudal sólido, altura e velocidade de escoamento na E5.



a) Maré Morta.

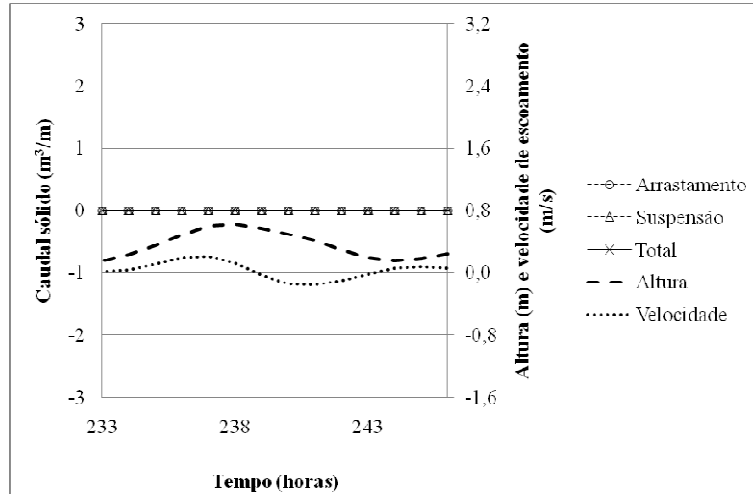


b) Maré Média.

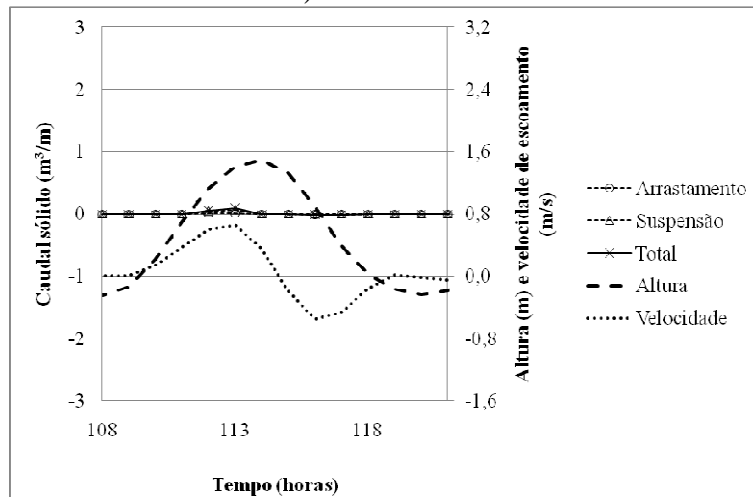


c) Maré Viva.

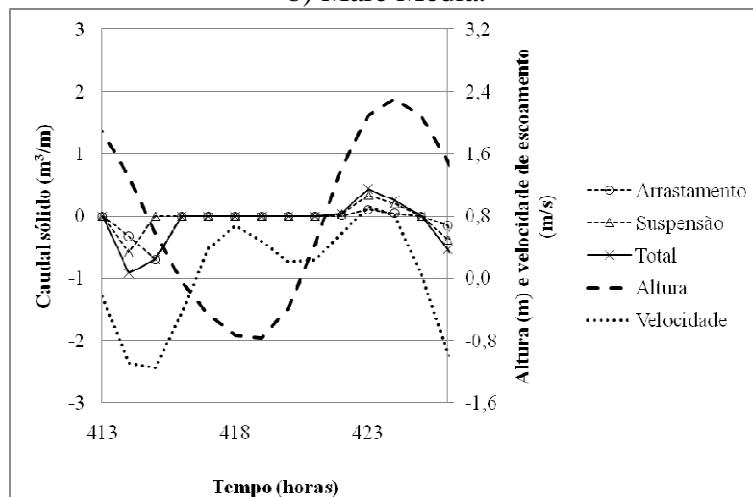
Figura D6: Variação do caudal sólido, altura e velocidade de escoamento na E7.



a) Maré Morta.

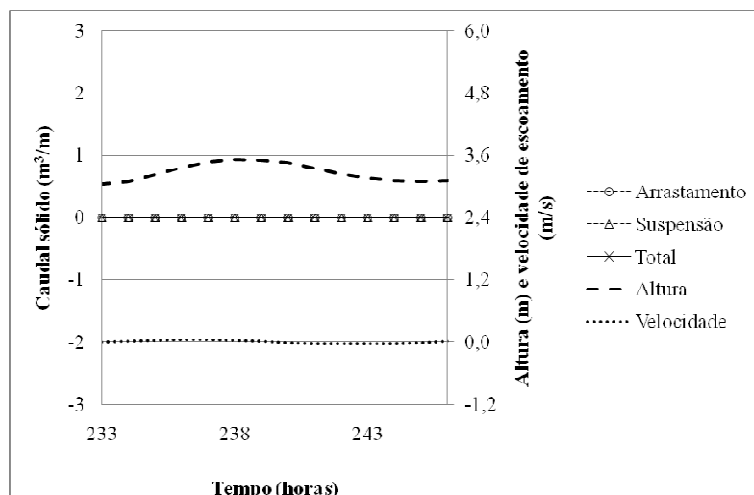


b) Maré Média.

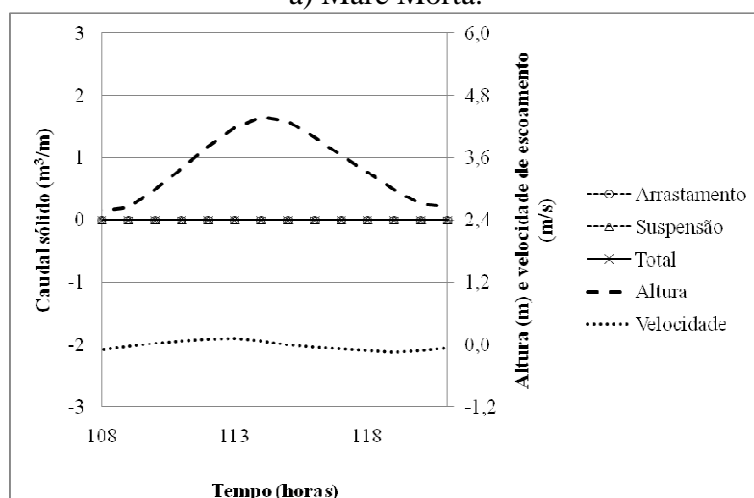


c) Maré Viva.

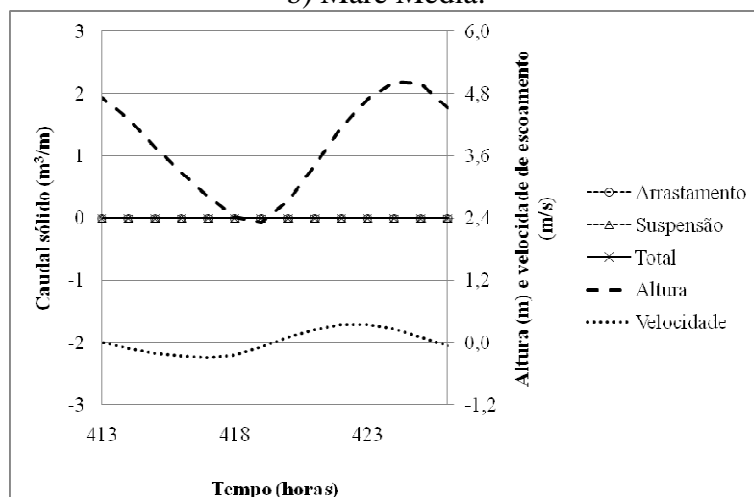
Figura D7: Variação do caudal sólido, altura e velocidade de escoamento na E14.



a) Maré Morta.

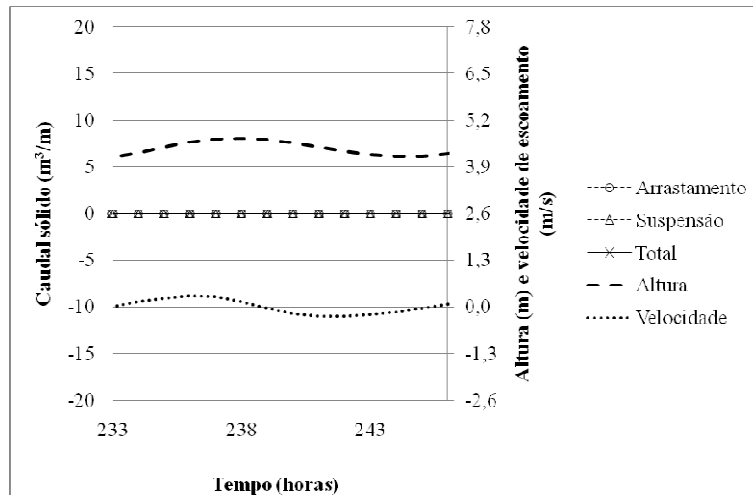


b) Maré Média.

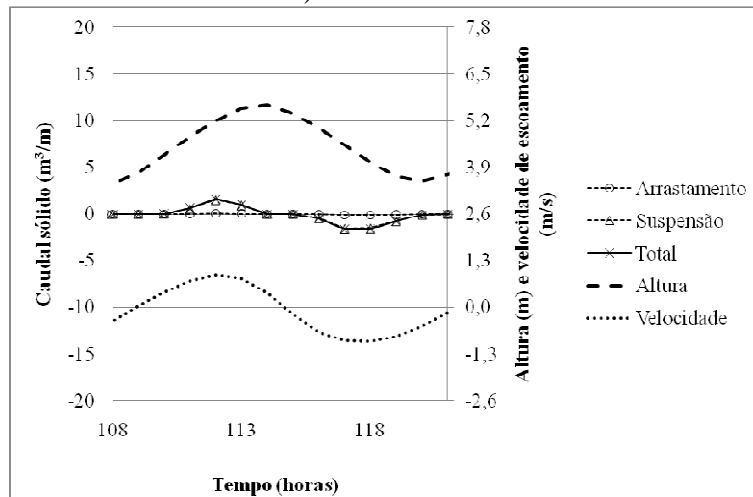


c) Maré Viva.

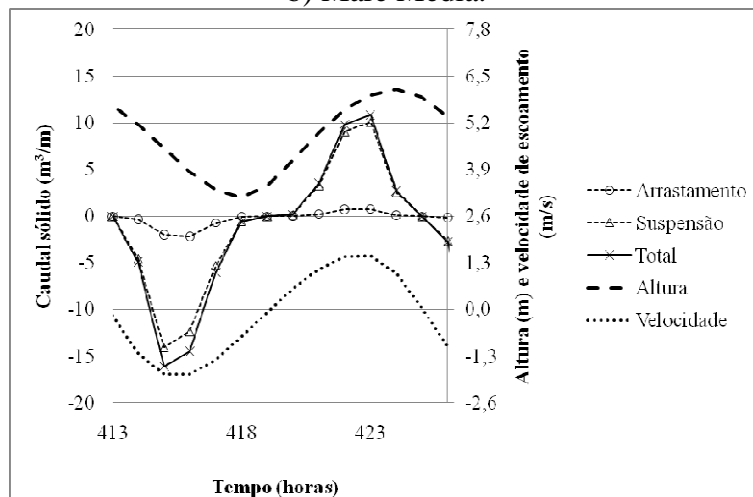
Figura D8: Variação do caudal sólido, altura e velocidade de escoamento na E16.



a) Maré Morta.

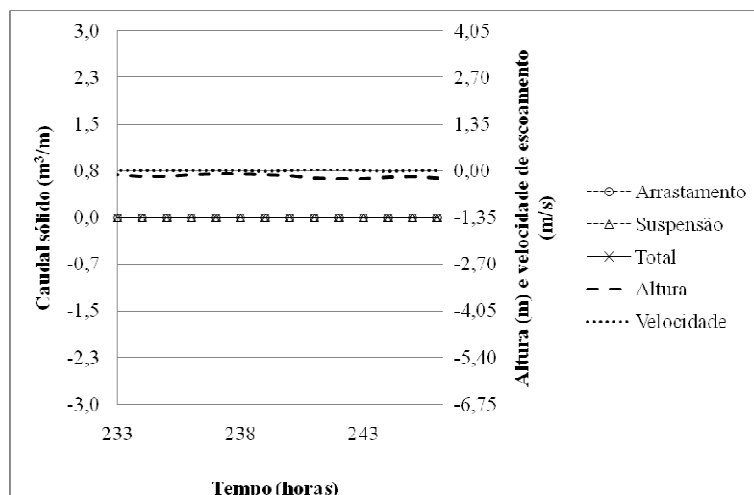


b) Maré Média.

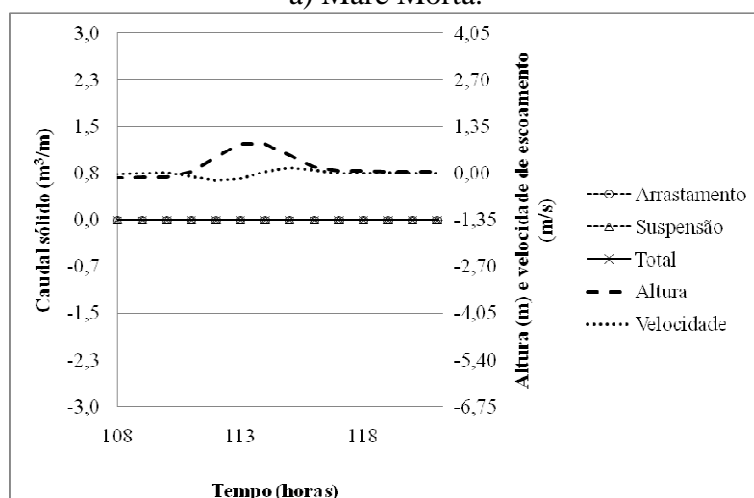


c) Maré Viva.

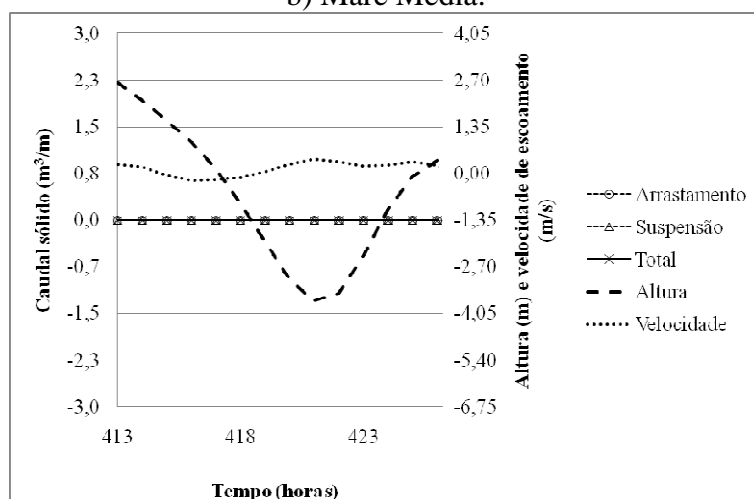
Figura D9: Variação do caudal sólido, altura e velocidade de escoamento na E17.



a) Maré Morta.

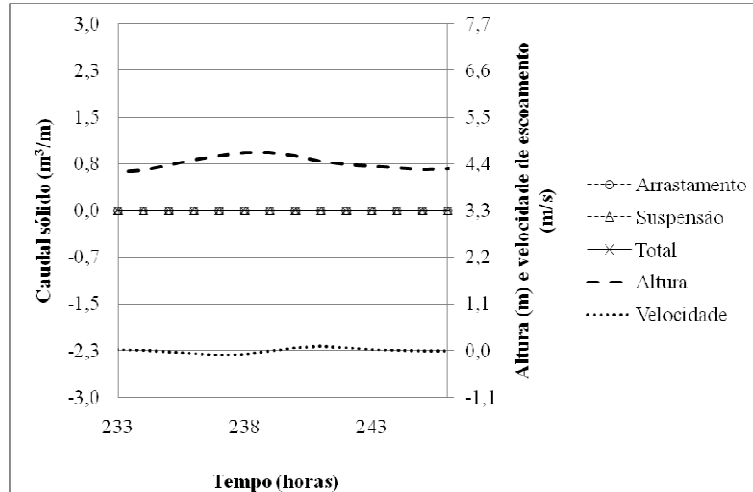


b) Maré Média.

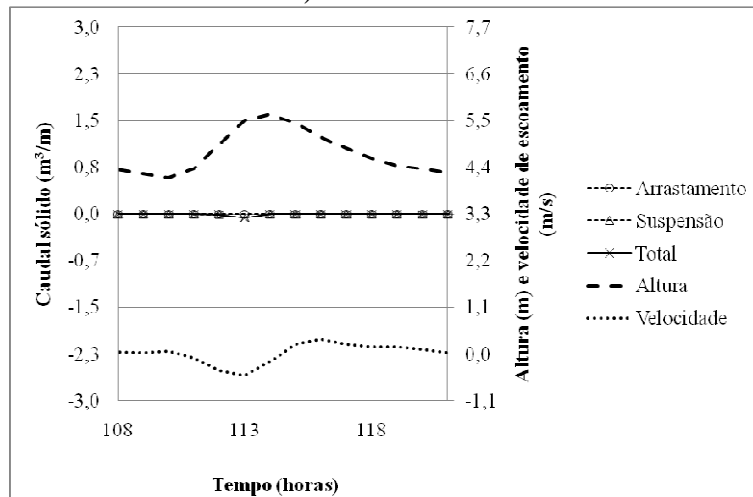


c) Maré Viva.

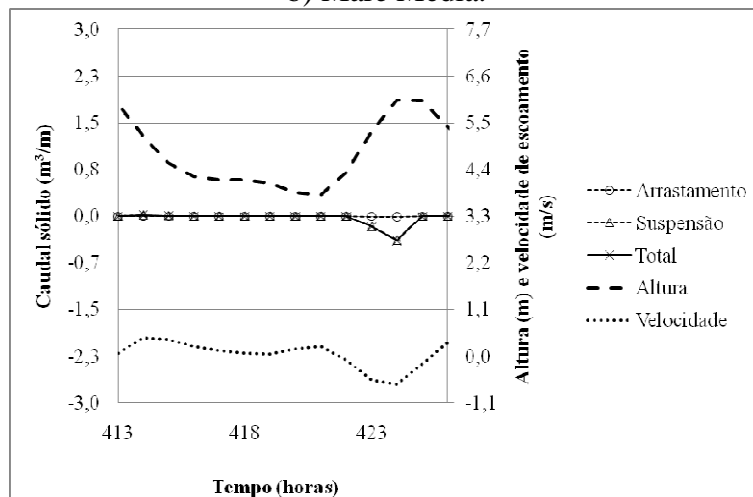
Figura D10: Variação do caudal sólido, altura e velocidade de escoamento na E18.



a) Maré Morta.

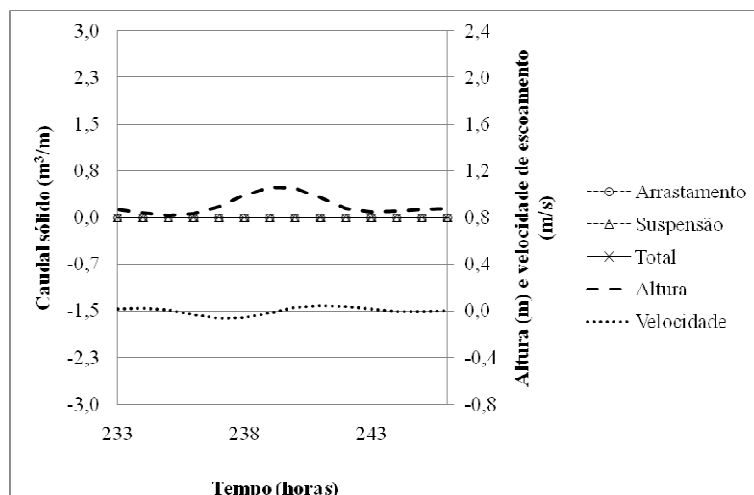


b) Maré Média.

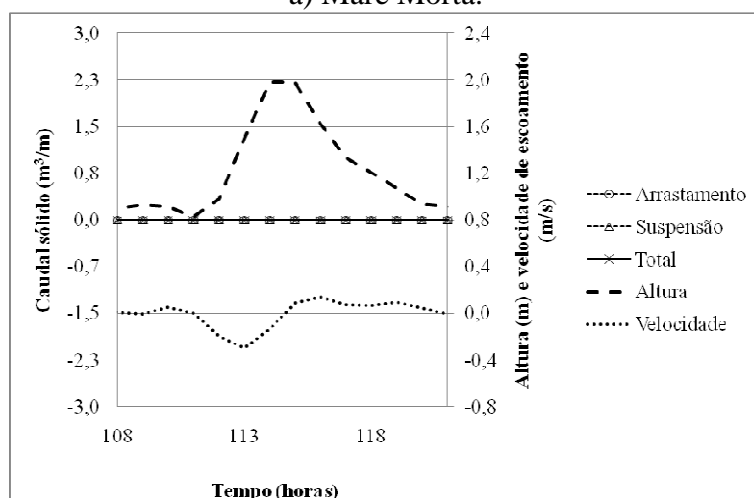


c) Maré Viva.

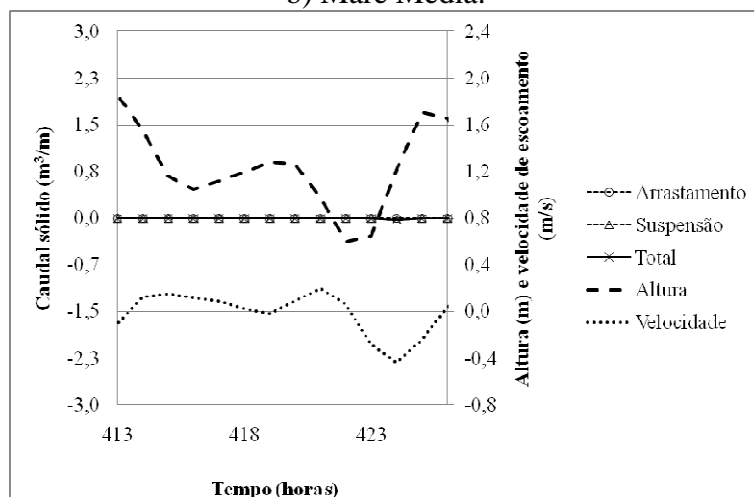
Figura D11: Variação do caudal sólido, altura e velocidade de escoamento na E19.



a) Maré Morta.

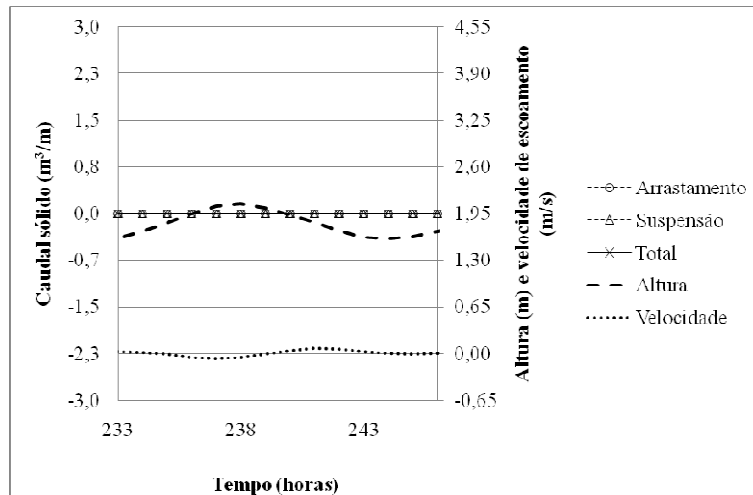


b) Maré Média.

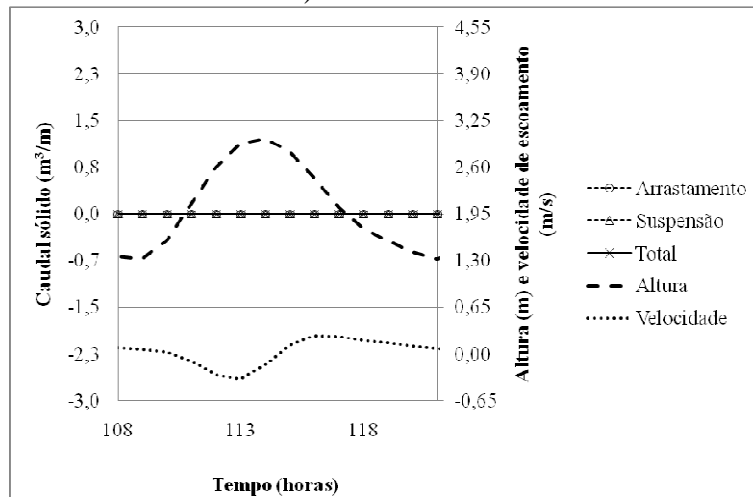


c) Maré Viva.

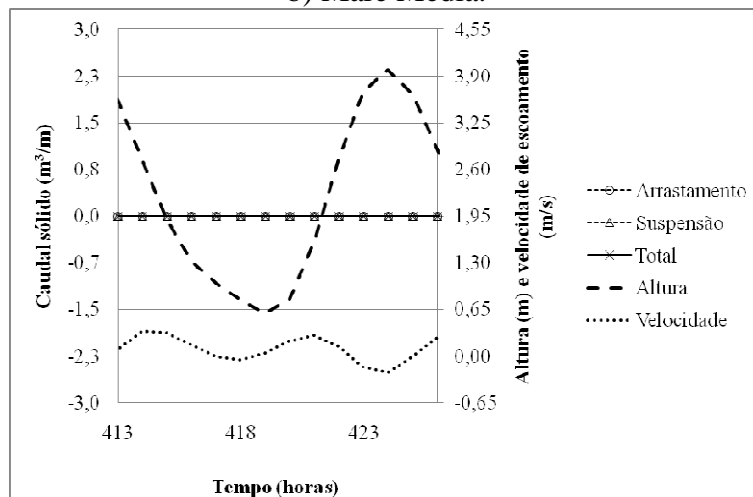
Figura D12: Variação do caudal sólido, altura e velocidade de escoamento na E20.



a) Maré Morta.

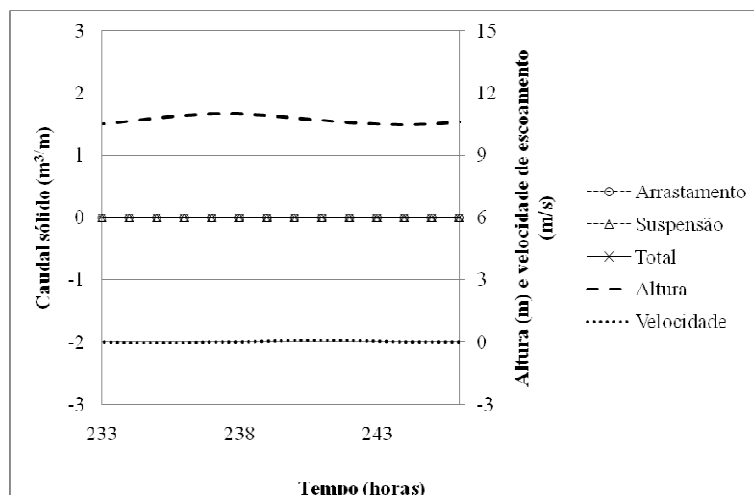


b) Maré Média.

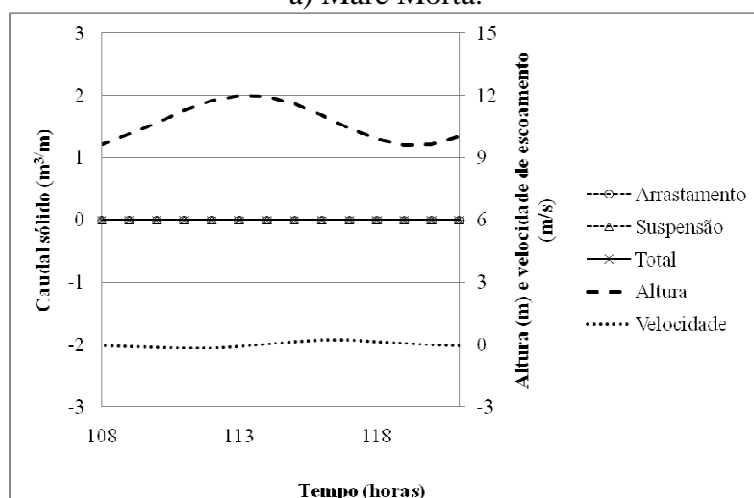


c) Maré Viva.

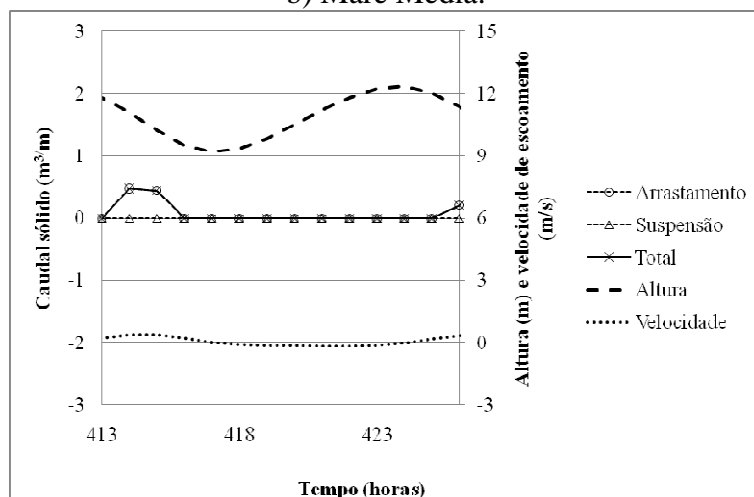
Figura D13: Variação do caudal sólido, altura e velocidade de escoamento na E21.



a) Maré Morta.

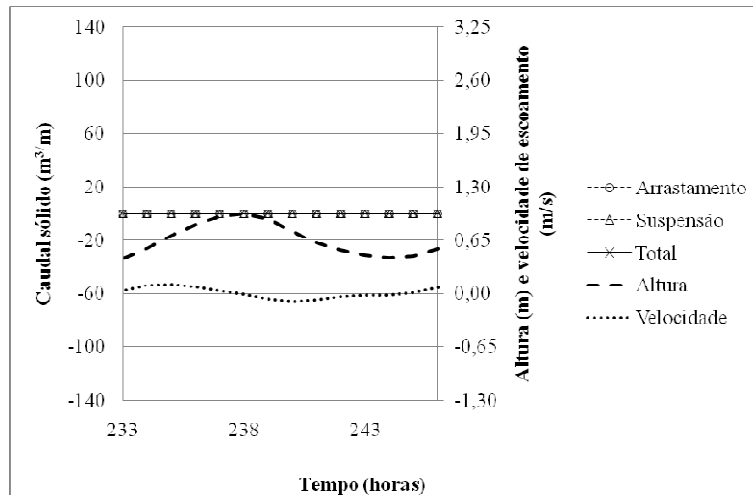


b) Maré Média.

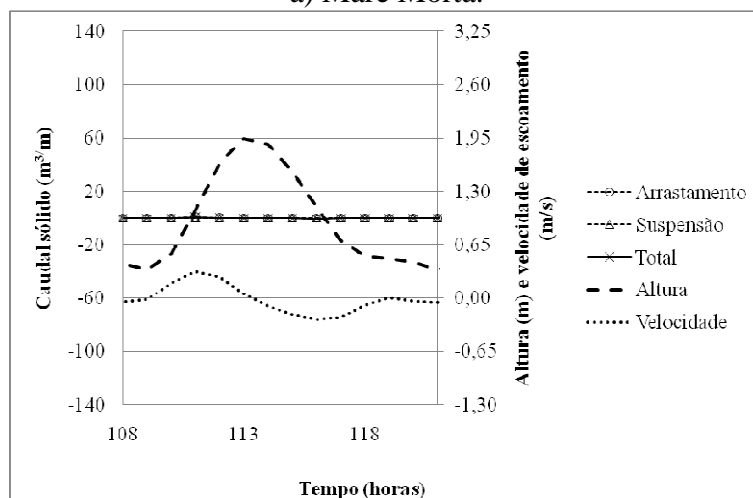


c) Maré Viva.

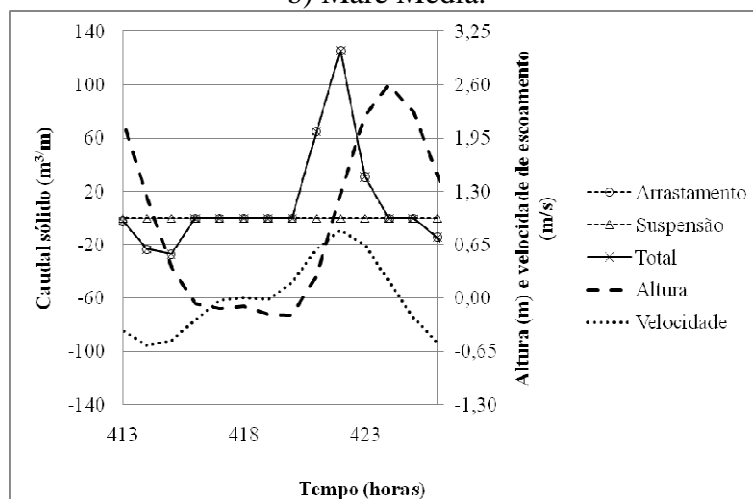
Figura D14: Variação do caudal sólido, altura e velocidade de escoamento na E22.



a) Maré Morta.

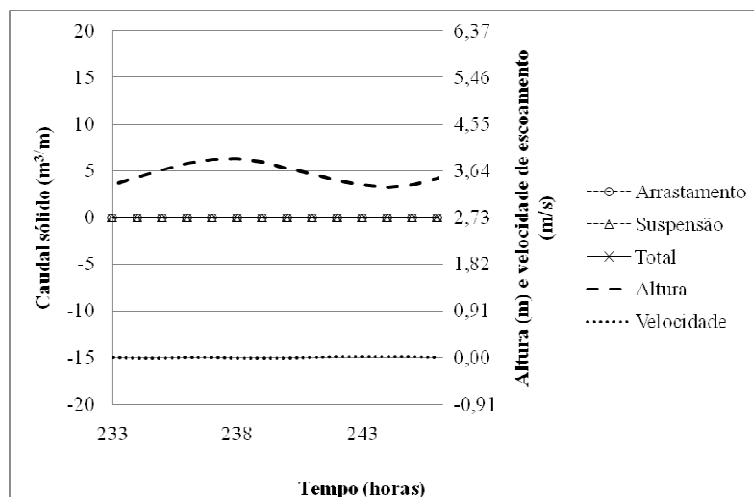


b) Maré Média.

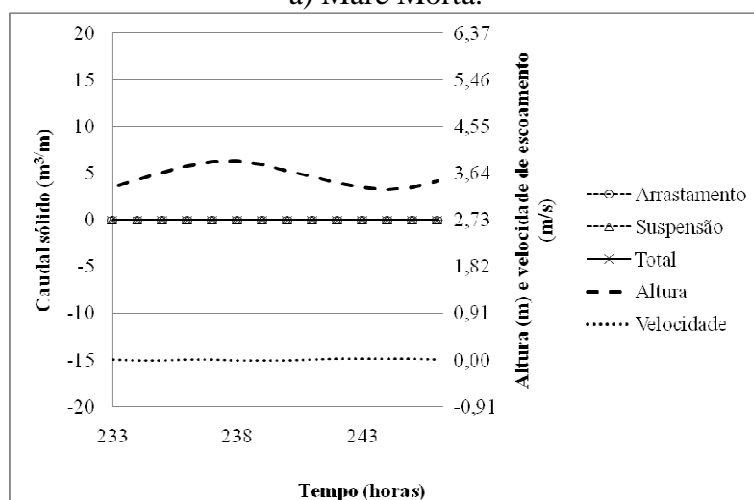


c) Maré Viva.

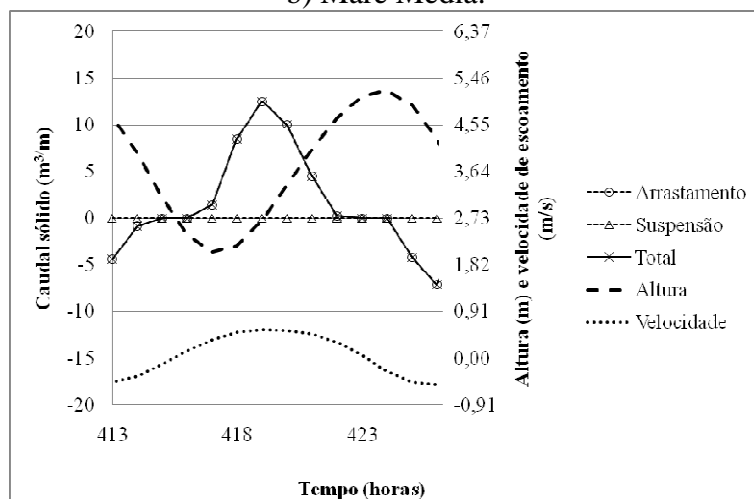
Figura D15: Variação do caudal sólido, altura e velocidade de escoamento na E23.



a) Maré Morta.

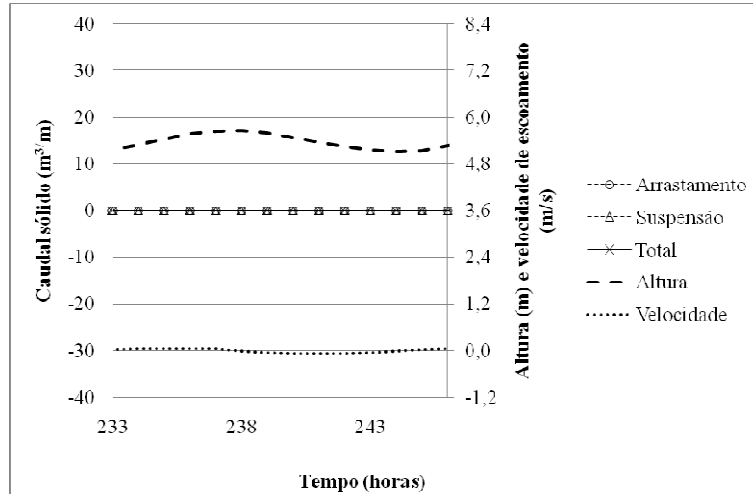


b) Maré Média.

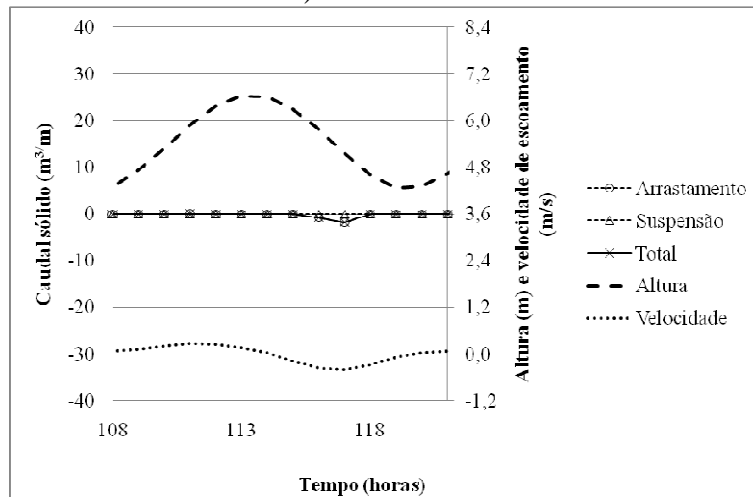


c) Maré Viva.

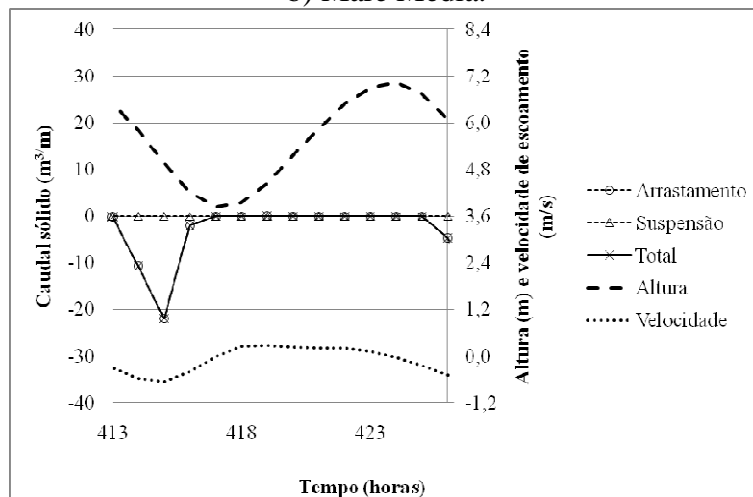
Figura D16: Variação do caudal sólido, altura e velocidade de escoamento na E24.



a) Maré Morta.

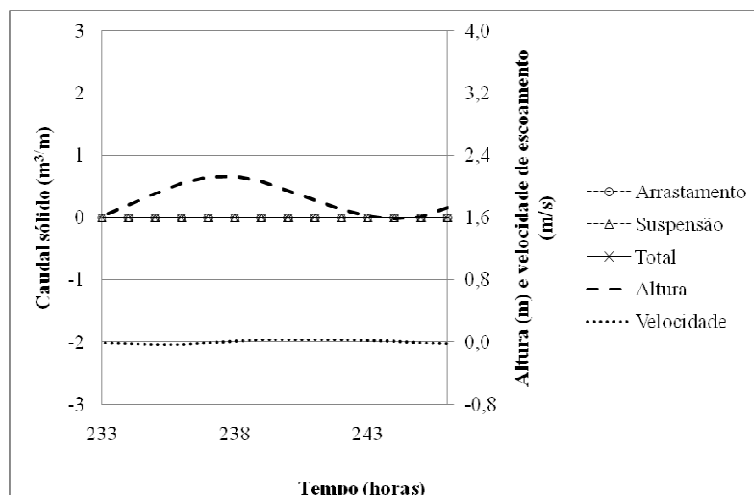


b) Maré Média.

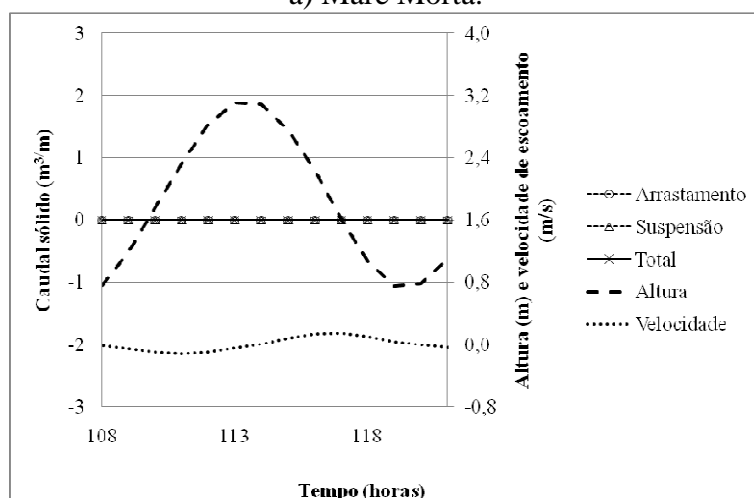


c) Maré Viva.

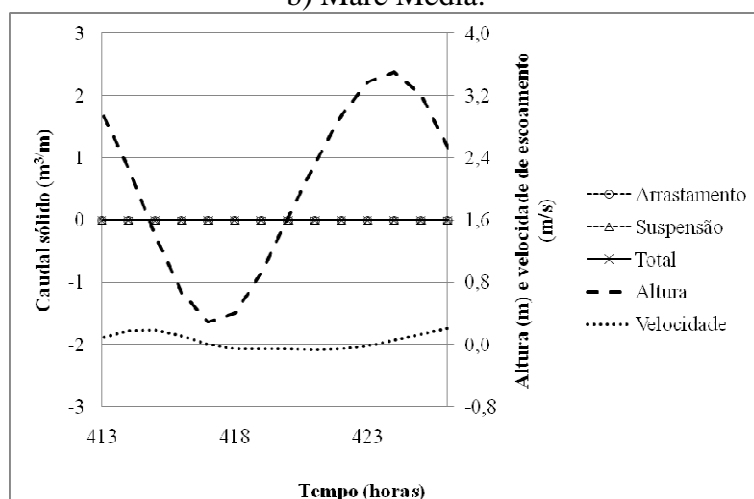
Figura D17: Variação do caudal sólido, altura e velocidade de escoamento na E25.



a) Maré Morta.

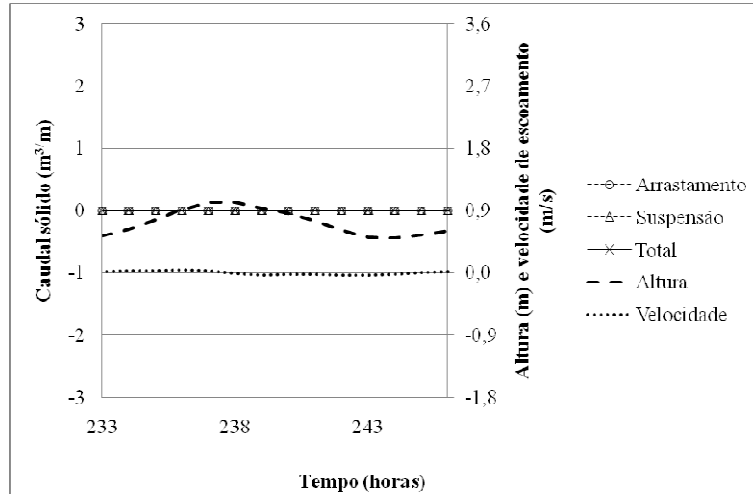


b) Maré Média.

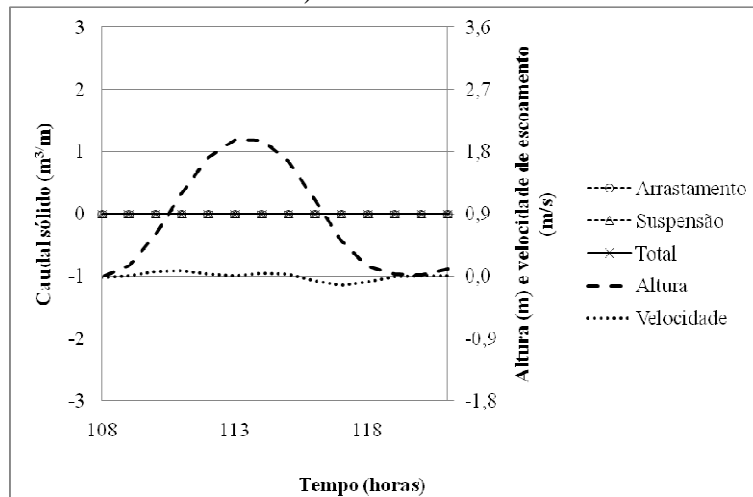


c) Maré Viva.

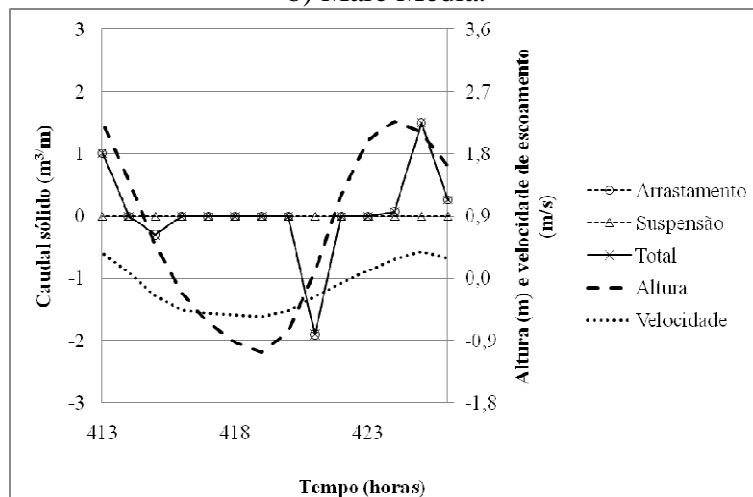
Figura D18: Variação do caudal sólido, altura e velocidade de escoamento na E26.



a) Maré Morta.

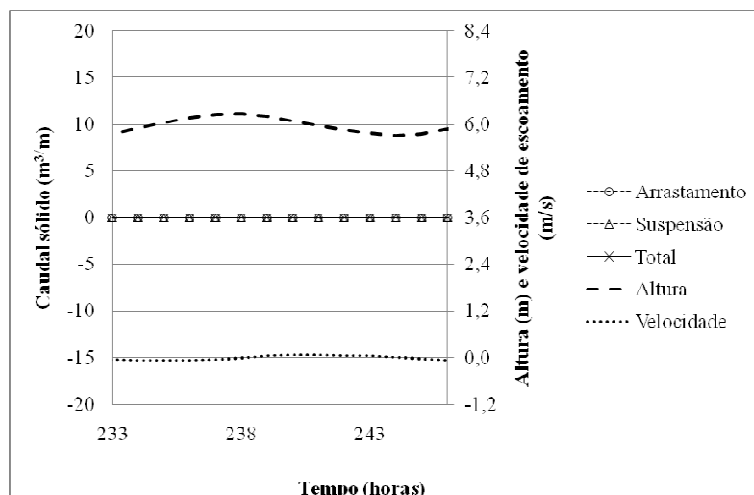


b) Maré Média.

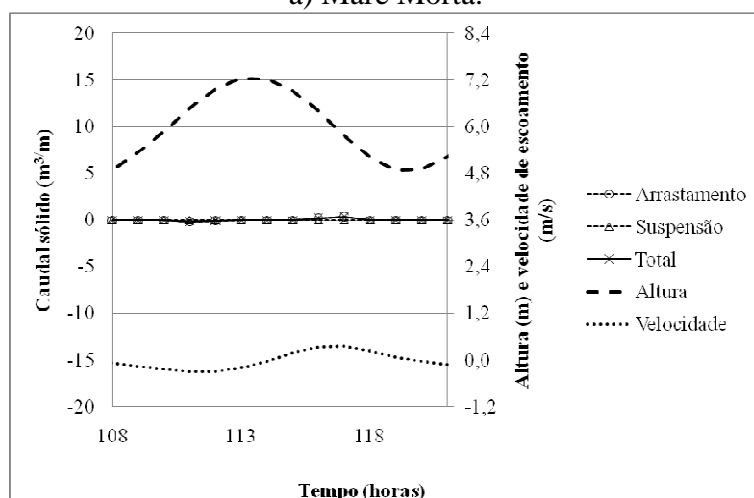


c) Maré Viva.

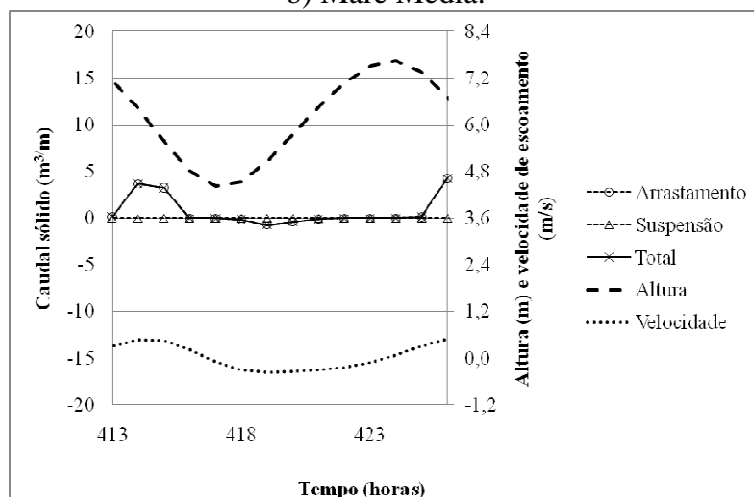
Figura D19: Variação do caudal sólido, altura e velocidade de escoamento na E27.



a) Maré Morta.

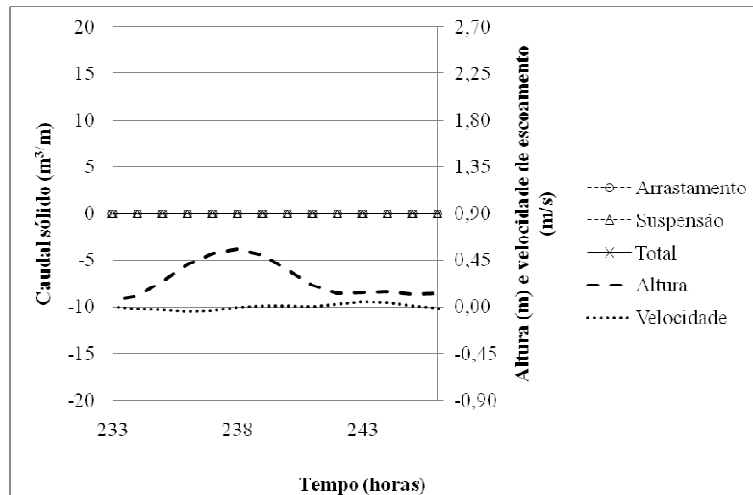


b) Maré Média.

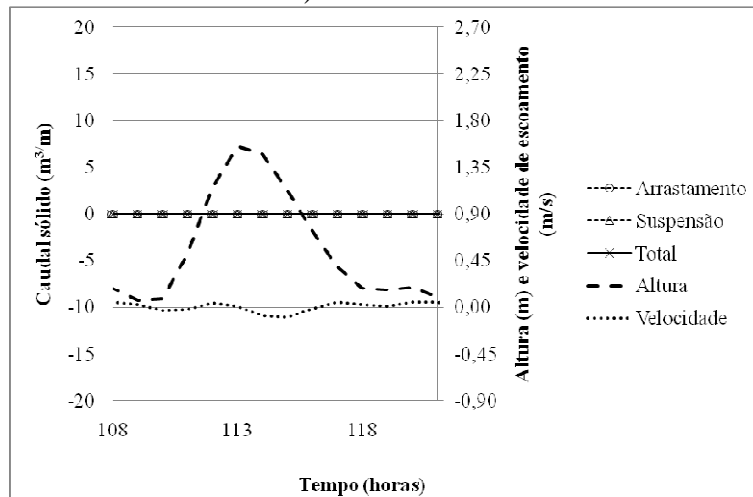


c) Maré Viva.

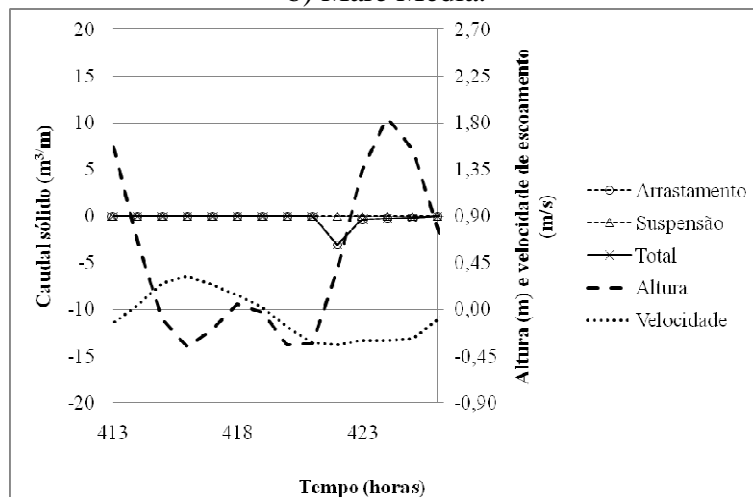
Figura D20: Variação do caudal sólido, altura e velocidade de escoamento na E28.



a) Maré Morta.

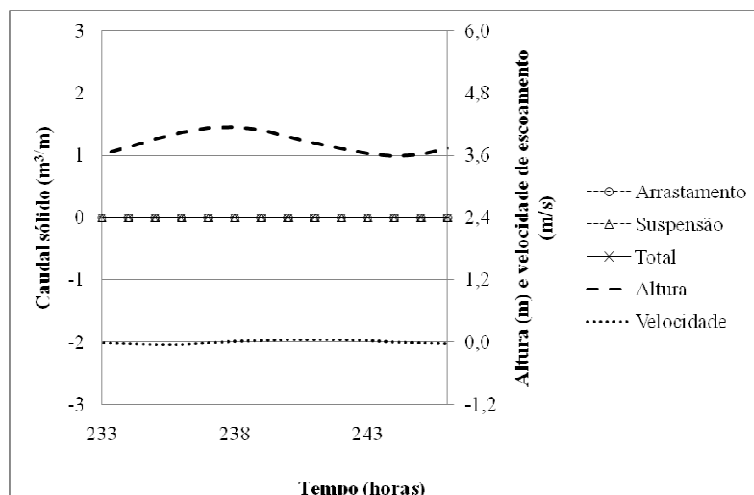


b) Maré Média.

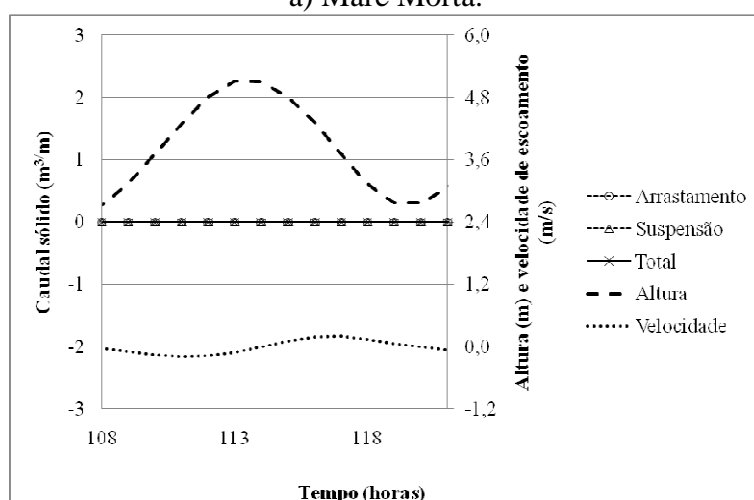


c) Maré Viva.

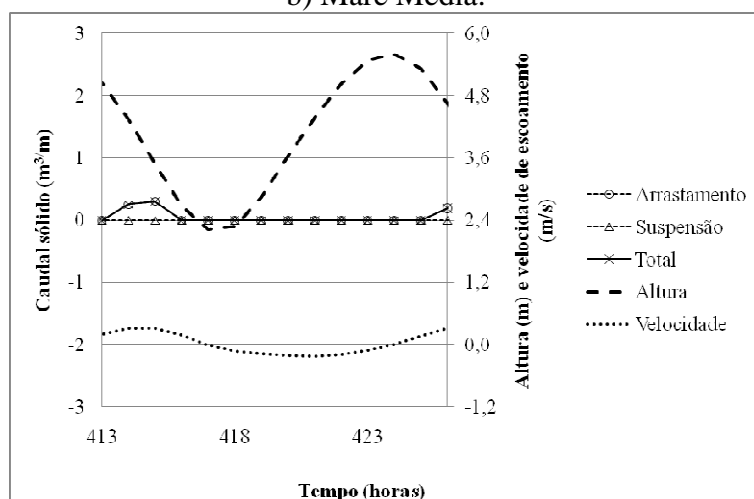
Figura D21: Variação do caudal sólido, altura e velocidade de escoamento na E29.



a) Maré Morta.



b) Maré Média.



c) Maré Viva.

Figura D22: Variação do caudal sólido, altura e velocidade de escoamento na E30.

