



INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO  
Universidade Técnica de Lisboa

# **Modelação de Evolução da Linha de Costa Influência do Uso de Séries Sintéticas de Agitação**

**Miguel Vaz Sena**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
**Engenharia Civil**

## **Júri**

Presidente: Prof. Dr. Augusto Martins Gomes  
Orientador: Prof. Dr. António Alexandre Trigo Teixeira  
Vogal: Prof. Dr. António Alberto Pires Silva

**Outubro 2010**



## RESUMO

O estudo da evolução da linha de costa, tendo em conta o uso de séries sintéticas de agitação marítima é um exame importante para a ciência que trata a zona costeira. O recurso a dados sinópticos do clima de agitação para estudos ou dimensionamento de zonas costeiras é cada vez mais uma realidade. O uso de dados provenientes de estações de registo ao largo nem sempre é viável, por motivos de erros de leitura por parte dos aparelhos que fazem o registo dos dados, pela difícil acessibilidade aos dados, ou ainda por custos relacionados com todo o processo de recolha de dados.

Nesta dissertação irá ser tratado este tema mediante simulações matemáticas realizadas num trecho da costa Ocidental Portuguesa, Figueira da Foz - Costa de Lavos. O objectivo primordial será simular a evolução da linha de costa, fazendo variar a ordem da classificação do clima de agitação ao largo, analisando posteriormente a influência que essa ordem teve na posição da linha de costa. Diferentes cenários de simulação foram criados de modo a representar da forma mais completa possível uma eventual influência da ordem de ocorrência dos eventos de agitação, na posição da linha de costa, fazendo variar a ordem sequencial de alturas e direcções de onda.

O modelo matemático responsável pela simulação da posição da linha de costa será o modelo GENESIS, enquanto um outro modelo, STWAVE, irá realizar a transformação do clima de agitação do largo para a costa. Estes dois modelos estão encaixados no programa informático CEDAS, desenvolvido pela *Veri-Tech*, que estabelece uma plataforma de interface modelos-utilizador.

Palavras-Chave: Modelação de Evolução da Linha de Costa, Influência do Uso de Séries Sintéticas de Agitação, Figueira da Foz, Costa de Lavos, GENESIS, STWAVE.



## ABSTRACT

The study of the evolution of the coastline, taking into account the use of synthetic sea series of agitation is an important analysis for science dealing with the coastal zone. The use of synoptic data of the wave climate for study or design of coastal areas is becoming a reality. The use of collection stations stationed offshore is not always feasible, due to errors in the data readings from the stations, due to the difficulty in accessing the data, or due to costs related to the whole data collection process.

This dissertation will be addressing this issue through mathematical simulations carried out in a stretch of the west coast of Portugal, Figueira da Foz - Costa de Lavos. The primary objective will be to simulate the evolution of the shoreline, by varying the order of classification of the wave climate offshore, and after analyzing the influence that this order has on the position of the coastline. Different simulation scenarios were created in order to represent as fully as possible any influence of the order of occurrence of wave events, in the position of the shoreline, by varying the sequential order of wave heights and directions.

The mathematical model responsible for simulating the evolution of the position of the shoreline will be the GENESIS model, while another model, STWAVE will accomplish the transformation of the wave climate from offshore to nearshore conditions. These two models are embedded in the CEDAS computer program, developed by Veri-Tech, which provides an interface platform for user-models.

Keywords: Modeling of the Evolution of a Coastline, Influence of Using Synthetic Series of Wave Climate, Figueira da Foz, Costa de Lavos, GENESIS, STWAVE.



## **AGRADECIMENTOS**

Agradecimento, expressão ou facto que manifesta gratidão. Nunca é demais reconhecer, sem qualquer excepção, que todos os meus amigos ajudaram, directa ou indirectamente, a construir este estudo. A todos eles, um grande obrigado.

Gostaria de deixar uma palavra aos meus colegas de curso, que ao longo deste me acompanharam, partilharam comigo as suas ideias, experiências, opiniões e dificuldades, e que tudo isto contribuiu fortemente para o meu desenvolvimento pessoal e intelectual.

Os meus mais sinceros agradecimentos ao meu orientador Prof. Dr. António Alexandre Trigo Teixeira, pela ajuda que sempre me dedicou e pelo empenho no esclarecimento das inúmeras dúvidas que permitiram a conclusão deste trabalho.

Aos amigos, colegas, engenheiros, Nuno Namorado, João Valente, Maria Sampaio, Inês Pipa, Andrea Mazzolari, Rui Almeida e muitos outros um especial agradecimento pela paciência, disponibilidade e enorme ajuda prestada.

A todos os meus familiares, em particular à minha irmã Filipa Sena, tia Margarida Vaz, namorada. Ana Lourenço e aos sempre bons almoços da avó Cecília, um agradecimento sentido.

O maior agradecimento segue obviamente aos meus Pais. É-me impossível descrever o quanto estou grato por tudo o que já fizeram por mim e que seguramente continuaram a fazer. Um enorme beijinho aos dois.





# ÍNDICE GERAL

<b>RESUMO.....</b>	<b>I</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>III</b>
<b>AGRADECIMENTOS.....</b>	<b>V</b>
<b>ÍNDICE GERAL .....</b>	<b>VII</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>XI</b>
<b>ÍNDICE DE QUADROS.....</b>	<b>XIII</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS.....</b>	<b>XV</b>
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1. ENQUADRAMENTO DO TRABALHO E OBJECTIVOS .....	1
1.2. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO .....	2
<b>2. PRINCÍPIOS TEÓRICOS.....</b>	<b>3</b>
2.1. ONDA GERADA PELO VENTO .....	3
2.2. TRANSPORTE SEDIMENTAR .....	4
2.2.1. MODOS DE TRANSPORTE .....	4
2.2.2. PROPRIEDADES DOS SEDIMENTOS.....	5
2.2.3. MEDIÇÃO DO TRANSPORTE SEDIMENTAR.....	6
2.3. FENÓMENOS DE ALTERAÇÃO DA AGITAÇÃO NA APROXIMAÇÃO À COSTA .....	8
2.4. TRANSPORTE LONGITUDINAL .....	12
2.4.1. CAUDAIS DE TRANSPORTE .....	13
2.4.1.1. CAUDAL RESULTANTE.....	13
2.4.1.2. CAUDAL TOTAL.....	14
2.5. FÓRMULA DE CERC .....	14
2.6. MODELOS DE TRANSPORTE LITORAL.....	19
2.6.1. MODELOS DE PROCESSOS MACRO.....	20
2.6.2. MODELOS TRIDIMENSIONAIS .....	20
2.6.3. MODELOS DE N-LINHAS.....	20
2.6.4. MODELOS DE LINHA.....	20

2.6.4.1. EXEMPLOS DE MODELOS DE LINHA.....	23
2.7. ESTUDOS ANÁLOGOS.....	23
<b>3. CASO DE ESTUDO, FIGUEIRA DA FOZ - COSTA DE LAVOS .....</b>	<b>27</b>
3.1. ENQUADRAMENTO E CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	27
3.2. DADOS DO CLIMA DE AGITAÇÃO.....	29
3.3. CONJUNTURA DE REFERÊNCIA E CENÁRIOS DE CÁLCULO.....	32
3.4. DOMÍNIO DE CÁLCULO.....	33
<b>4. MODELAÇÃO DO CASO DE ESTUDO .....</b>	<b>35</b>
4.1. PREPARAÇÃO DOS DADOS DE MODELAÇÃO.....	37
4.1.1. GRID GENERATOR.....	37
4.1.2. WWWL.....	39
4.1.3. WSAV.....	39
4.1.4. SPECGEN.....	41
4.2. PROPAGAÇÃO DO CLIMA DE AGITAÇÃO .....	41
4.2.1. STWAVE .....	42
4.3. GENESIS.....	43
4.3.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS .....	43
4.3.1.1. ESTRUTURA DO MODELO .....	44
4.3.1.2. CONDIÇÕES DE FRONTEIRA.....	46
4.3.1.3. CAPACIDADES E LIMITAÇÕES DO MODELO.....	47
4.3.1.4. EXEMPLO DE APLICAÇÃO .....	48
4.3.2. POSIÇÃO DA LINHA DE COSTA.....	51
4.3.3. PARÂMETROS DE CONTROLO.....	51
4.3.3.1. PROFUNDIDADE DE FECHO E COTA DE BERMA .....	51
4.3.3.2. DIMENSÃO MÉDIA DOS SEDIMENTOS .....	53
4.3.3.3. CONDIÇÕES DE FRONTEIRA.....	54
4.3.4. CALIBRAÇÃO DO MODELO GENESIS.....	55
4.3.4.1. PARÂMETROS DE CALIBRAÇÃO .....	55
<b>5. RESULTADOS.....</b>	<b>57</b>
5.1. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS DO MODELO STWAVE.....	57
5.2. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS DO MODELO GENESIS.....	60
5.2.1. ANÁLISE INDIVIDUAL DOS CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO.....	61
5.2.2. ANÁLISE DOS CENÁRIOS SIMULADOS.....	61
<b>6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>75</b>

<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>77</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>83</b>



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Processos de movimentação do transporte longitudinal, adaptada de Coelho, 2005 .....	5
Figura 2.2 – Exemplo de uma armadilha de transporte de fundo ( <a href="http://www.rickly.com">www.rickly.com</a> ) .....	7
Figura 2.3 - Representação esquemática de fenómenos de alteração da propagação da agitação na aproximação à costa (Coelho, 2005) .....	12
Figura 2.4 - Representação dos sentidos do caudal resultante .....	14
Figura 2.5 - Representação do ângulo de onda incidente na zona de rebentação (U.S. Army Corps of Engineers, 2006) .....	15
Figura 2.6 - Variação da taxa de transporte com o ângulo de incidência de onda .....	17
Figura 2.7 - Classificação de modelos numéricos em escalas temporais e espaciais, (Hanson, et al., 1991) .	19
Figura 2.8 - Representação da movimentação da linha de costa em modelos de linha, ( <a href="http://www.coastalwiki.org">www.coastalwiki.org</a> ) .....	21
Figura 2.9 – Esquema representativo do cálculo da evolução da linha de costa através de modelos de linha, (Hanson, et al., 1991) .....	22
Figura 2.10 - Influência da sequência da direcção de onda na evolução da linha de costa, (Hanson, 1987) ..	24
Figura 2.11 - Influência da sequência da altura de onda na evolução da linha de costa, (Hanson, 1987) .....	24
Figura 3.1 – Localização e representação das áreas de implementação dos modelos matemáticos .....	27
Figura 3.2 – Construção do molhe norte do porto da Figueira da Foz, 1961, (Carvalho, et al., 1966) .....	28
Figura 3.3 – Classificação do local de estudo, domínio matemático versus domínio real .....	29
Figura 3.4 - Métodos de registo de dados de onda, (Komar, 1998) .....	30
Figura 3.5 – Excerto da representação dos dados topográficos e batimétricos, zona da foz do rio Mondego .	33
Figura 4.1 – Organograma representativo da modelação .....	36
Figura 4.2 – Representação em 3D da grelha do modelo STWAVE, adaptado do software CEDAS .....	37
Figura 4.3 – Representação de um <i>zoom</i> nas grelhas dos modelos STWAVE e GENESIS, adaptado do software CEDAS .....	38
Figura 4.4 – Histograma de percentagem de ocorrência de alturas, direcção e período de onda, CEDAS .....	40
Figura 4.5 – Diagrama de rosa representativo das direcções de onda, CEDAS .....	40
Figura 4.6 – Representação do funcionamento do modelo STWAVE no software CEDAS, adaptado de CEDAS .....	42
Figura 4.7 - Representação do método de diferenças finitas cálculo do transporte longitudinal, (Hanson, 1987) .....	45
Figura 4.8 - Vista geral do caso de estudo de Bolsa Chica, adaptado de U.S. Army Corps of Engineers, 2006 e Google Maps .....	49
Figura 4.9 - Características do local de estudo Bolsa Chica (U.S. Army Corps of Engineers, 2006) .....	50
Figura 4.10 – Representação das fronteiras do modelo GENESIS, adaptado de CEDAS .....	54

Figura 5.1 – Gráfico representativo da altura de onda na profundidade de fecho .....	58
Figura 5.2 – Gráfico representativo da direcção de onda na profundidade de fecho .....	59
Figura 5.3 – Evolução da altura de onda do largo para a costa .....	59
Figura 5.4 - Evolução da direcção de onda do largo para a costa .....	60
Figura 5.5 – Comparação da linha de costa simulada após 20 anos de simulação entre os cenários A e B e a linha de costa inicial .....	63
Figura 5.6 - Diferenças da linha de costa após 20 anos de simulação entre os cenários A e B .....	64
Figura 5.7 - Comparação da linha de costa simulada após 20 anos de simulação entre os cenários C e D e a linha de costa inicial .....	65
Figura 5.8 - Diferenças da linha de costa após 20 anos de simulação entre os cenários C e D .....	66
Figura 5.9 - Comparação da linha de costa simulada após 20 anos de simulação entre os cenários E, F e G, e a linha de costa inicial.....	67
Figura 5.10 - Diferenças da linha de costa após 20 anos de simulação entre os cenários E, F e G .....	68
Figura 5.11 - Comparação da linha de costa simulada após 20 anos de simulação entre os cenários A, B, C, D, E, F e G e a linha de costa inicial .....	69
Figura 5.12 - Diferenças da linha de costa após 20 anos de simulação entre os cenários A, B, C, D, E, F e G.....	70
Figura 5.13 - Comparação da linha de costa simulada após 20 anos de simulação entre os cenários A, B, C, D, E, F e G, e a linha de costa inicial, na zona do campo de esporões Cova-Gala.....	71
Figura 5.14 - Diferenças da linha de costa após 20 anos de simulação entre os cenários A, B, C, D, E, F e G, na zona do campo de esporões Cova-Gala.....	71
Figura 5.15 - Comparação da linha de costa simulada após 20 anos de simulação entre a média dos cenários A, B, C, D, o cenário E e a linha de costa inicial, na zona do campo de esporões Cova-Gala .....	72
Figura 5.16 - Diferenças da linha de costa após 20 anos de simulação entre a média dos cenários A, B, C, D e o cenário E, na zona do campo de esporões Cova-Gala.....	72
Figura 5.17 - Volume resultante de sedimentos correspondente à mudança da linha de costa no final de 20 anos de simulação, para os diferentes cenários.....	73

## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 - Classificação da rebentação segundo <i>Ibarren</i> .....	12
Quadro 3.1 - Ondas características ao largo do Cabo Mondego.....	31
Quadro 3.2 - Caudais característicos da faixa costeira em estudo.....	32
Quadro 3.3 - Cenários de estudo .....	32
Quadro 4.1 - Profundidades de fecho.....	53
Quadro 4.2 - Escala granulométrica de <i>Wentworth</i> para areias grosseiras e médias .....	53
Quadro 4.3 - Resultados da calibração do modelo GENESIS.....	56





## LISTA DE SÍMBOLOS

$a_1$  e  $a_2$  - Parâmetros adimensionais do modelo GENESIS  
 $C$  – Celeridade  
 $C_{gb}$  - Celeridade na zona de rebentação  
 $C_f$  - Coeficiente de fricção que depende do número de *Reynolds* e da rugosidade do fundo  
 $d_B$  - Cota de berma  
 $d_c$  ,  $h_c$ - Profundidade de fecho  
 $D_{50}$  – Diâmetro médio dos sedimentos  
 $E_b$  – Energia de onda na zona de rebentação  
 $g$  - Aceleração da gravidade  
 $h$  - Profundidade relativa ao nível de repouso;  
 $h_r$  - Profundidade de rebentação de onda  
 $H$  - Altura de onda  
 $H_b$  - Altura de onda na rebentação  
 $H_s$  – Altura de onda significativa  
 $H_{mas}$  - Altura de onda significativa máxima anual  
 $H_{bs}$  – Altura de onda significativa na zona de rebentação  
 $I_l$  - Taxa de transporte de peso imerso  
 $K$  – Factor adimensional  
 $k$  - Índice de rebentação de altura de onda  
 $K_1$  e  $K_2$  - coeficientes empíricos de calibração do modelo GENESIS  
 $L$  - Comprimento de onda  
 $L_\infty$  - Comprimento de onda ao largo  
 $m$  - Declive do fundo  
 $n$  - Coeficiente de porosidade  
 $P_l$  - Componente longitudinal da energia de fluxo  
 $q$  - Linha de fonte  
 $Q_{NET}$  - Caudal resultante anual  
 $Q_R$  - Caudal resultante com sentido esquerda-direita  
 $Q_L$  - Caudal resultante com sentido direita-esquerda  
 $Q_{GROSS}$  - Caudal total anual  
 $Q_l$  – Caudal de transporte longitudinal  
 $S$  – Declive da praia  
 $T$  - Período de Onda  
 $T_{HS}$  - Período associado à altura de onda significativa  
 $u_m$  – Componente horizontal máxima da velocidade  
 $V_0$  - Velocidade teórica na zona de rebentação

$V_l$  – Corrente longitudinal medida num ponto na zona de rebentação  
 $\bar{v}_l$  – Velocidade média da corrente longitudinal  
 $W$  - Largura da zona de rebentação

$\alpha_b$  - Ângulo de incidência da onda na zona de rebentação  
 $\alpha_{bg}$  - Ângulo relativo a uma linha de controlo na zona de rebentação  
 $\alpha_{sg}$  - Ângulo relativo à linha de controlo  
 $\Delta y$  – Variação da distância perpendicular  
 $\Delta x$  - Variação da distância longitudinal  
 $\Delta t$  - Intervalo de tempo  
 $\Delta V$  - Variação de volume de sedimentos  
 $\delta$  – Declividade de onda  
 $\xi_b$  - Número de *Ibarren*  
 $\rho_s$  - Massa volúmica de sólidos  
 $\rho$  - Massa volúmica da água





# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. ENQUADRAMENTO DO TRABALHO E OBJECTIVOS

A influência de acções naturais e de origens antropogénicas nas zonas costeiras é demais evidente. Factores como o vento, as marés, a agitação marítima, subida do nível médio das águas do mar, aproveitamentos energéticos e sedimentares, como dragagens e extracções de areia, ou até o contrário como alimentação de praias, passando ainda por construções de defesa ou urbanização da faixa litoral, são factores que modificam e muitas vezes colocam em risco zonas costeiras.

A agitação marítima é a principal acção forçadora do transporte de sedimentos nos trechos costeiros. Em cada instante o transporte depende das variáveis que caracterizam localmente a agitação: altura, período e direcção de propagação da onda. Num determinado período o transporte resultante depende da frequência e da sequência segundo as quais ocorrem os diversos tipos de agitação. Por esta razão, para o sucesso da simulação do transporte de sedimentos torna-se determinante a caracterização cuidadosa do clima de agitação da região em estudo (Barata, et al., 1996).

O estudo de séries sintéticas de clima de agitação incide em suma na análise da influência da ordem de ocorrência dos eventos de agitação. Com este trabalho pretende-se avaliar o comportamento da evolução da linha de costa quando se fazem variar as condições do clima de agitação a largo.

O local escolhido para por em prática este estudo foi o trecho de costa a sul do esporão Sul, da foz do rio Mondego. Este trecho alberga toda a costa até ao esporão da povoação de Costa de Lavos, e tem um comprimento de aproximadamente 5960m.

De uma forma sucinta pode-se afirmar que os elementos utilizados na realização do estudo foram os seguintes:

- registos tratados de uma bóia-ondógrafo;
- informação morfológica, batimétrica e topográfica do local;
- modelos matemáticos, integrados em sistemas de simulação.

O modelo matemático GENESIS é responsável pela simulação dos avanços e recuos da linha de costa e permitiu produzir os resultados finais deste trabalho, tendo como principal gerador da variação da linha de costa o transporte longitudinal de sedimentos gerado junto à costa. Este tipo de transporte está dependente essencialmente de três factores, características da onda, características da praia e características dos sedimentos.

## 1.2. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A dissertação está organizada em 6 capítulos distintos, sendo o primeiro a Introdução, onde para além da organização da dissertação é também apresentado um breve enquadramento do trabalho aqui descrito.

No segundo capítulo é abordada toda a teoria que serve de base ao estudo aqui apresentado. Neste capítulo pretende-se explicar toda a mecânica implícita no transporte litoral, passando por fazer referência à onda gerada pelo vento, ao transporte sedimentar, aos fenómenos de alteração da agitação na aproximação à costa (difracção, refração, reflexão, espraiamento e refluxo, empolamento e rebentação), bem como a todo o processo matemático que envolve o transporte longitudinal, fazendo referência a modelos e fórmulas analíticas de cálculo do transporte (CERC). Por fim são referidos dois estudos análogos realizados por *Hanson* em 1987 e *Le Méhauté et al* em 1983.

No capítulo 3 é apresentado o caso de estudo que irá por em prática toda a teoria apresentada no capítulo anterior. Neste capítulo são expostos os dados do clima de agitação, bem como os cenários e o domínio de cálculo.

O capítulo 4 apresenta todo o processo de preparação de dados, modelação e calibração do caso de estudo. Para além da explicação de todo o método utilizado para produzir os resultados finais desta dissertação, este capítulo faz uma alusão ao modo como os principais modelos matemáticos, STWAVE e GENESIS, funcionam, formulando a teoria que caracteriza cada um deles.

No capítulo 5 são apresentados os resultados produzidos pelos modelos STWAVE e GENESIS. É feita uma análise individual e comparativa dos resultados das simulações matemáticas efectuadas nos diferentes cenários de cálculo.

Por fim, no capítulo 6, são apresentadas as principais conclusões das diferentes análises realizadas durante este trabalho. São também apresentados desenvolvimentos futuros que permitam obter conclusões mais claras relativamente às questões que envolvam a parametrização do clima de agitação.

## 2. PRINCÍPIOS TEÓRICOS

### 2.1. ONDA GERADA PELO VENTO

Uma onda é caracterizada pelo seu comprimento de onda  $L$ , isto é, a distância horizontal, medida num dado momento, entre duas cristas ou duas cavas consecutivas; pela altura  $H$ , distância vertical duma cava à crista imediatamente a seguir; e pelo seu período  $T$ , que se define como o intervalo de tempo compreendido entre a passagem de duas cristas sucessivas por um ponto fixo. A sua velocidade de propagação  $C$ , ou seja a velocidade com que se desloca a forma da onda (velocidade de fase ou celeridade), é definida pela seguinte expressão:

$$C = \frac{L}{T} \quad (2.1)$$

Em que as grandezas envolvidas são as definidas anteriormente. Interessa ainda considerar o quociente  $\delta = \frac{H}{L}$ , designado por declividade de onda (Abecasis, et al., 1957).

A onda gerada pelo vento actua como agente de transmissão de energia. Numa primeira fase estas ondas obtêm a energia gerada pelo vento, que depois é transmitida para o oceano, que por sua vez a transporta para a zona costeira, onde se poderão desenvolver diversos processos de mitigação acompanhados por dissipação de energia.

As vagas são o resultado de ondas geradas pelo vento, de carácter irregular e crista curta, encontram-se na zona limitada e influenciada pelo vento, *fetch*. A análise estocástica e espectral de tal tipo de onda torna-se necessária, dada a aleatoriedade e a dispersão do espectro de frequência que este tipo de onda evidencia. À medida que a onda se afasta do local de geração, torna-se mais regular, dando origem à chamada ondulação.

A relação de dispersão traduz o carácter dispersivo da propagação das ondas geradas pelo vento na superfície do mar, estabelecendo uma relação entre a frequência e o comprimento de onda.

$$\sigma^2 = gk \tanh(kh),$$

Onde  $k = \frac{2\pi}{L}$ , correspondente ao número de onda e  $h$  é a profundidade relativa ao nível de repouso.

Segundo Abecasis, et al., 1957, a transformação de um conjunto de ondas irregulares para regulares, dá-se à medida que estas ondas se afastam da zona geradora, onde cada comboio de ondas se propaga na sua direcção característica e com uma velocidade que é função do período das ondas

sinusoidais que o constituem. Daí resulta a separação dos vários comboios, de tal modo que o espectro de cada comboio se torna mais estreito e as ondas mais regulares.

Nesta dissertação apenas irão ser tratadas ondas regulares ou monocromáticas, ou seja, o período e a amplitude de onda são invariáveis no tempo.

## 2.2. TRANSPORTE SEDIMENTAR

O litoral arenoso comporta-se como um rio de areia que corre ao longo da costa, transportando carga sólida. O perfil do litoral está portanto em constante actividade, recebendo sedimentos a montante, a jusante, do largo e para o largo, tendendo este para uma posição de equilíbrio.

Esta mobilidade conduz a perfis transversais de Verão (perfil de acalmia), com declives suaves, diferentes dos de Inverno (perfil de temporal) de energia mais alta, mais abruptos e com roturas de declive. Aos perfis de Verão estão associadas areias mais finas, já os perfis de Inverno são compostos por sedimentos de granulometria mais grosseira, areão e cascalho (Galopim de Carvalho, 2003).

Segundo Adélio Silva, 1991, a evolução geológica da orla costeira pode ser classificada, em termos temporais, da seguinte forma:

- Evolução geológica (escala temporal de séculos);
- Evolução de longo prazo (escala temporal de anos);
- Evolução de curto prazo que apresenta variabilidade sazonal.

De referir ainda a escada de tempestades, onde a evolução geológica da orla costeira apresenta uma variabilidade da ordem das horas ou dias.

A dissertação aqui desenvolvida irá simular a evolução da linha de costa a longo prazo, com um limite de simulação de 20 anos.

### 2.2.1. MODOS DE TRANSPORTE

Os sedimentos podem ser transportados de duas formas, transporte em suspensão e transporte de fundo. No transporte de fundo (*bedload*) os sedimentos mantêm-se perto do mesmo. Este pode ser classificado em três categorias:

- Transporte por arrastamento/deslizamento;



- Transporte por rolamento;
- Transporte por salto ou saltação.

A classificação descrita em cima está organizada por ordem crescente de velocidade de transporte, neste sentido, o transporte por saltação é aquele que necessita de maior velocidade para colocar os sedimentos em movimento e vencer a força de atrito de fundo. Assim que o efeito de corte, efeito associado à força necessária para vencer o atrito de fundo, supera a força de gravidade (velocidade de queda dos sedimentos) estes entram em movimento.

A suspensão de material sedimentar está directamente relacionada com a velocidade e turbulência do escoamento. Quanto maiores forem estas duas grandezas, maior será a quantidade de material transportado, ao longo de toda a coluna de água.

A Figura 2.1 representa o modo como o material submerso é transportado segundo a direcção longitudinal, formando a chamada deriva litoral. Os sedimentos transportados tomam a direcção e sentido da onda que os transporta. No caso do transporte por arrastamento junto à linha de costa os sedimentos acompanham a onda segundo a maior pendente do talude da praia, seguindo os fenómenos de refluxo e espraiamento de onda. A zona de rebentação é aquela que regista maior movimentação de sedimentos. A forte turbulência gerada pela rebentação das ondas coloca os sedimentos em suspensão e é nesta zona que se fazem sentir as maiores concentrações de sedimentos que aumentam com a profundidade.

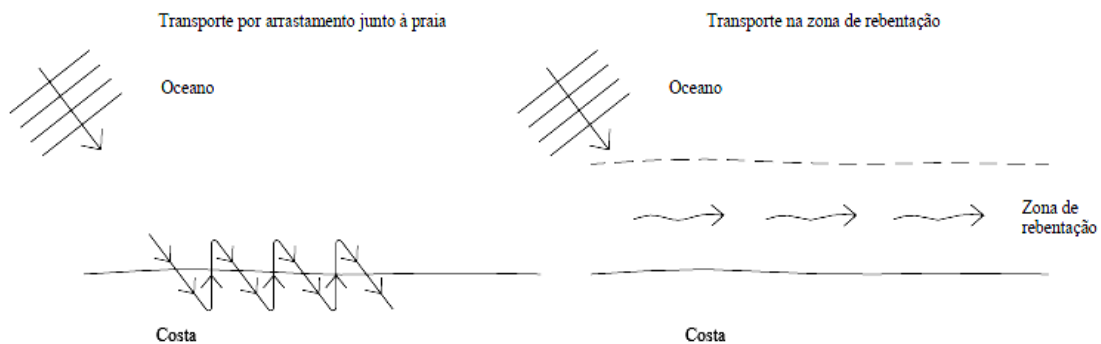


Figura 2.1 - Processos de movimentação do transporte longitudinal, adaptada de Coelho, 2005

### 2.2.2. PROPRIEDADES DOS SEDIMENTOS

A análise das propriedades dos sedimentos transportados na deriva litoral é uma componente importante num estudo da evolução da linha de costa, nomeadamente na calibração de modelos matemáticos. A classificação de sedimentos é usualmente feita através do diâmetro mediano,  $D_{50}$ , expresso em milímetros.

Da Silva, 1991, esclarece sobre vários métodos de caracterização do diâmetro do sedimento, entre os quais se enquadram:

- Diâmetro da peneira;
- Diâmetro da esfera com o mesmo volume;
- Comprimento da dimensão menor, maior ou intermédia dos grãos segundo os eixos coordenados, ou ainda uma combinação dos três;
- Diâmetro da esfera com iguais valores de densidade e velocidade de queda.

A zona em estudo é composta maioritariamente por areias, a sua constituição morfológica não irá aqui ser tratada, pois o seu contributo para a modelação matemática tem fraca expressão.

A dimensão média dos sedimentos varia no tempo e no espaço. No Inverno, a praia é composta por grãos de areia com maiores dimensões quando comparados com períodos de Verão. A dimensão média dos sedimentos também varia ao longo do perfil transversal de uma praia; segundo Komar, 1998, a maior dimensão dos sedimentos está localizada na zona de rebentação, zona de maior dissipação de energia e conseqüente turbulência.

O estudo das propriedades dos sedimentos pode oferecer informações importantes relativas à velocidade de queda dos sedimentos e ao seu ângulo de repouso, no entanto é importante referir que outros factores podem entrar na estimativa destes parâmetros, tais como a temperatura, a turbulência e a concentração de sedimentos.

### 2.2.3. MEDIÇÃO DO TRANSPORTE SEDIMENTAR

A quantificação da deriva litoral é fisicamente uma tarefa de difícil execução. É comum encontrar estudos que tratam este tema com base em modelos de escala reduzida concebidos em laboratórios, em que as conclusões são depois extrapoladas para as condições verificadas *in loco*. De seguida são enumeradas algumas técnicas que podem, contudo, ser aplicadas directamente no local de estudo ou em ensaios laboratoriais.

#### Observação visual:

Uma forma de determinar a direcção e a quantidade de sedimentos que é transportada é a de observar como os sedimentos se depositam quando encontram obstáculos, naturais ou artificiais, que interrompam o transporte sedimentar.

A observação de deposição e erosão de determinadas áreas de um trecho de costa pode ser feita através de fotografias aéreas ou por qualquer outro tipo de técnica que ofereça informação visual,

que faculte uma noção geral da evolução costeira e da quantidade de sedimentos movimentada. Embora se trate de uma técnica de avaliação grosseira, está entre as mais expeditas, e no caso de uma análise rápida e sucinta, entre as melhores.

#### Identificadores de sedimentos (*sand tracers*):

A utilização de *sand tracers* passa por marcar os sedimentos naturais de praia através de substâncias fluorescentes, ou de os envolver em cápsulas, que mantenham as suas propriedades hidrodinâmicas. De seguida são enumerados alguns tipos de identificadores utilizados em sedimentos:

- Identificadores radioactivos, utilizados em medições ao largo;
- Grãos de alumínio que retratam os sedimentos, este método tem a vantagem de ser fácil a sua posterior localização na praia, através de magnetómetros;
- Observação de minerais específicos, que no fundo funcionam como identificadores, podem também ser bons indicadores de qual o sentido e direcção do transporte.

#### Armadilhas (*traps*):

As técnicas mais comuns que utilizam armadilhas, servem maioritariamente para medir sedimentos transportados em suspensão e devolvem resultados que quantificam o transporte segundo um eixo vertical medido a partir do fundo. No entanto, também existem armadilhas que quantificam o transporte de fundo (*bedload*); na Figura 2.2 está representado um exemplo de uma armadilha desse género.

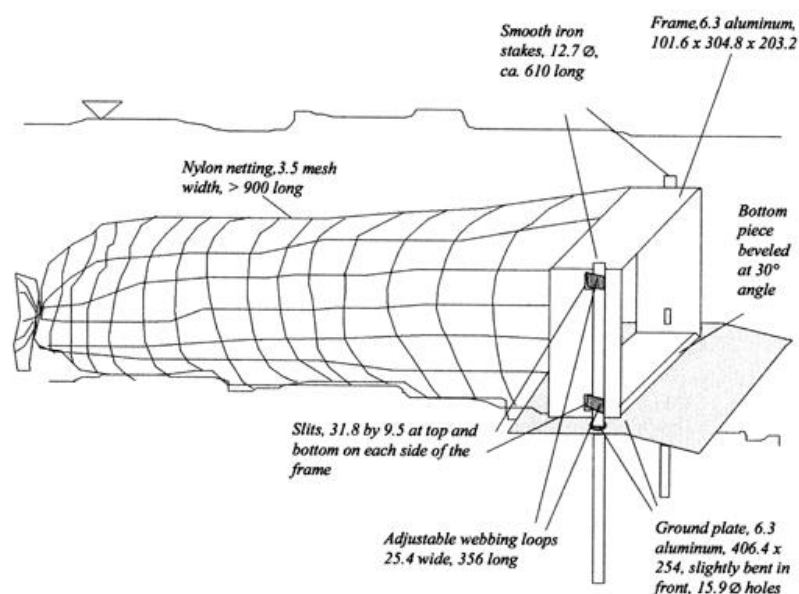


Figura 2.2 – Exemplo de uma armadilha de transporte de fundo ([www.rickly.com](http://www.rickly.com))

### Análise granulométrica:

Outra técnica implica a análise granulométrica e morfológica dos sedimentos transportados, determinando a sua origem e consequentemente a sua direcção de transporte.

A granulometria dos sedimentos pode fornecer informação sobre a distância de transporte. O grão transportado diminui de tamanho ao longo do seu trajecto de transporte, pois sofre mitigação ao longo do percurso de transporte, quer por erosão química e física por parte da água do mar, quer por colisão com outros sedimentos (Komar, 1998). No entanto em determinados minerais, tais como o quartzo, este tipo de análise tem pouca expressão, pois este acaba por sofrer poucas alterações.

Esta teoria tem as suas falhas, uma vez que existem outros factores que influenciam a perda de tamanho dos grãos transportados, relacionados com variações de energia e com locais de origem dos sedimentos.

De forma a acelerar o processo de avaliação e também para obter resultados mais objectivos, estas técnicas de medição de transporte são muitas vezes acompanhadas por alimentação artificial, mediante bombeamento de água contendo sedimentos, na zona de rebentação.

## **2.3. FENÓMENOS DE ALTERAÇÃO DA AGITAÇÃO NA APROXIMAÇÃO À COSTA**

A propagação da agitação do largo para a costa é acompanhada e influenciada por vários fenómenos. Enquanto as características ao largo se podem assumir aproximadamente idênticas numa vasta extensão, as características junto à costa são próprias de cada local, já que são influenciadas pelos fundos e pelo “recorte” da costa. Estes fenómenos ocorrem por interacção entre as ondas e os fundos e fronteiras sólidas tais como praias, falésias, estruturas portuárias, etc (Coelho, 2005).

De seguida é feita uma breve introdução aos fenómenos responsáveis pela alteração da característica da onda, quando propagada. A Figura 2.3 representa cada um desses fenómenos de uma forma sucinta.

### Difracção

A difracção é um fenómeno resultante da interacção onda-obstáculo, esse obstáculo pode ser uma qualquer construção marítima ou qualquer impedimento natural. A esta interacção está associada uma transferência lateral de energia ao longo da crista da onda da zona exposta directamente à acção da onda, para a zona abrigada.

Como é possível verificar através da Figura 2.3, o movimento ondulatório na zona abrigada manifesta-se por frentes de onda curvas, centradas no extremo do quebramar. Esta mudança de direcção da onda é acompanhada por um decréscimo contínuo e rápido da altura de onda.

A energia da onda que passa através do obstáculo expande-se em todas as direcções que daí divergem, formando a chamada zona de sombra, embora com um fluxo tanto menos intenso quanto mais essas direcções se afastam do obstáculo de incidência (Mota Oliveira, n.d.).

### Refracção

Um trecho de crista de onda rectilíneo manter-se-á indefinidamente constante enquanto se propagar em profundidades superiores a meio comprimento de onda, profundidades ao largo (Mota Oliveira, n.d.).

O fenómeno de refracção de ondas marítimas está directamente ligado ao fundo do mar. De facto este consiste numa reorientação das ondas por influência directa das curvas batimétricas e apenas se faz sentir quando o fundo interage com a onda, em profundidades intermédias ou pequenas.

Este fenómeno é o principal responsável pela variação da altura de onda aquando da sua propagação desta para a costa. À medida que a onda avança para a costa esta vai perdendo velocidade de fase, consequência directa da perda de energia por refracção por parte dos “fundos”.

### Reflexão

A reflexão consiste numa mudança de direcção da onda quando esta entra em contacto com um obstáculo. Considere-se o diagrama da Figura 2.3, a onda ao encontrar um obstáculo a um determinado ângulo de incidência, ângulo de reflexão, sofre uma diminuição de energia, absorvida pelo obstáculo. A energia reflectida será inferior à energia associada à onda incidente, quer porque esta se dissipa sobre o obstáculo reflector (por atrito ou mesmo por rebentação), quer porque o ultrapassa (por transmissão ou por galgamento).

A capacidade reflectora de um obstáculo depende das suas características, tais como a inclinação ou a rugosidade/porosidade, e pode-se afirmar que essa mesma capacidade é tanto maior, quanto menor for a energia da onda dissipada no obstáculo. Entende-se por reflexão total o caso onde as ondas incidem sobre um obstáculo liso, impermeável e vertical; enquanto que a reflexão parcial corresponde ao caso onde a energia da onda incidente não é completamente absorvida pelo obstáculo reflector, correspondendo este a um plano inclinado.

### Espraiamento e Refluxo

Entende-se por espraiamento a fase de propagação da onda que se verifica após a rebentação desta. A quantificação do espraiamento é importante na determinação da parte activa de um perfil de praia, logo num projecto de obras costeiras. Se a cota máxima de espraiamento exceder a cota de coroamento de estruturas (quebramares, enrocamentos, etc.), ocorre o galgamento das mesmas. O fenómeno de espraiamento está dependente da reflexão das ondas, da influência das curvas batimétricas, bem como da porosidade, rugosidade, permeabilidade e do nível freático. Os sucessivos fenómenos de espraiamento são intercalados por fenómenos de refluxo, correspondendo à cota mais baixa atingida na interacção entre a onda marítima e a praia ou estrutura costeira (Coelho, 2005).

### Empolamento

O empolamento corresponde a um aumento progressivo da altura de onda como resposta à diminuição da profundidade. Assumindo que não existe dissipação de energia nem reflexão da onda e que esta se propaga com direcção constante, então o fluxo de energia é constante. Na realidade, em águas profundas, a energia é transportada pelo grupo de ondas e não pelas ondas individuais. Porém, em águas pouco profundas, a velocidade do grupo de ondas e a velocidade das ondas individuais é a mesma. Como nestas águas pouco profundas a velocidade da onda é função directa da profundidade, à medida que esta diminui a velocidade da onda decresce proporcionalmente. Nestas condições, para manter o fluxo de energia constante, a onda sofre transformações por forma a que a energia por unidade de área aumente. Com efeito, se a quantidade de ondas num dado período é o mesmo mas a velocidade diminui, cada onda terá que transportar mais energia. Atendendo a que a energia da onda é função da altura da onda, para se adaptar a estas condições as ondas vão progressivamente aumentando de altura. O período da onda, todavia, mantém-se constante, pelo que se verifica, também, diminuição do comprimento de onda. Tal significa que a declividade da onda vai aumentando progressivamente, atingindo, a muito pequenas profundidades o valor limite e acaba por ocorrer a rebentação da onda (<http://www.aprh.pt/>).

### Rebentação

A concentração de energia numa profundidade decrescente dá origem a um processo de instabilização progressiva da onda que culmina na rebentação, fenómeno complexo caracterizado por grande turbulência, em regra com emulsão de ar, que provoca a rápida dissipação de grandes quantidades de energia (Mota Oliveira, n.d.).

O estudo da determinação da zona de rebentação da onda é complexo e muito discutido. Segundo Mota Oliveira, n.d., a profundidade de rebentação pode ser expressa pela seguinte relação:

$$\frac{H}{h_r} = 0,78 \quad (2.2)$$

Onde:

- $H$  - altura de onda,
- $h_r$  - profundidade de rebentação de onda.

É passível de se concluir que a profundidade de rebentação é da mesma ordem de grandeza que a altura de onda.

A rebentação também ocorre a grandes profundidades (rebentação parcial). De facto a grandes profundidades pode ocorrer uma instabilização da onda, resultado de um excesso de declividade gerado pelo vento, formando manchas de espuma, usualmente chamadas por “carneiros”, em inglês *white capping*.

A rebentação está classificada em três grupos, rebentação progressiva (*spilling*), rebentação mergulhante (*plunging*) e rebentação de fundo (*surging*). Na rebentação progressiva, tal como o nome o indica, a onda rebenta de uma forma contínua, num percurso relativamente longo, numa praia de talude suave. A rebentação do tipo mergulhante é caracterizada por praias com talude áspero e por ondas com pequenas declividades, ocorrendo de uma forma súbita. Menos frequente é o tipo de rebentação de fundo, onde a energia da onda é dissipada na zona de espraiamento de uma praia de declive acentuado, e a emulsão de ar gerada é muito menor que nos outros tipos já descritos.

O tipo de rebentação pode ser caracterizado através do número de *Ibarren*, definido pela seguinte expressão:

$$\xi_b = \frac{S}{(H_b/L_\infty)^{1/2}} \quad (2.3)$$

Onde:

- $S$  – declive da praia,
- $H_b$  - altura de onda na rebentação,
- $L_\infty$  - comprimento de onda ao largo.

A rebentação está portanto directamente ligada à declividade de onda  $\left(\frac{H_b}{L_\infty}\right)$  e ao declive da praia. Os valores característicos de cada tipo de rebentação, segundo a expressão de *Ibarren* estão representados no Quadro 2.1.

Quadro 2.1 - Classificação da rebentação segundo Ibarren

Tipo de Rebentação	Intervalo de Ibarren
Progressiva	$\xi_b < 0,5$
Mergulhante	$0,5 < \xi_b < 3,3$
De Fundo	$3,3 < \xi_b$

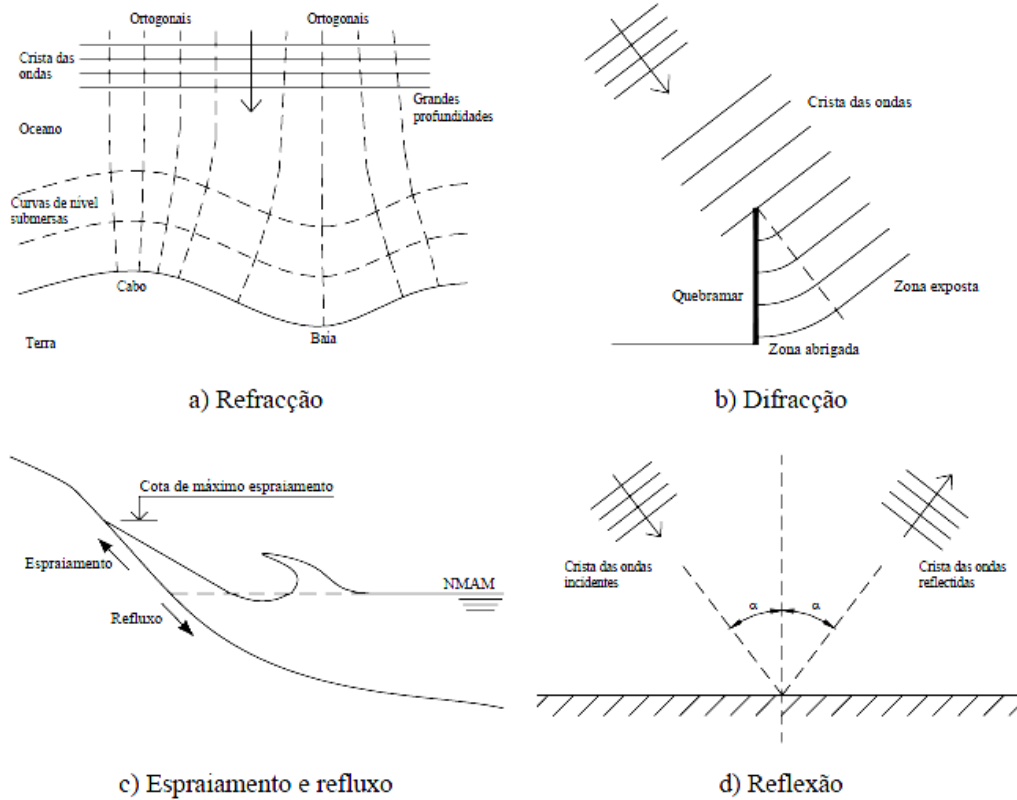


Figura 2.3 - Representação esquemática de fenómenos de alteração da propagação da agitação na aproximação à costa (Coelho, 2005)

## 2.4. TRANSPORTE LONGITUDINAL

O conhecimento do transporte longitudinal de sedimentos é essencial do ponto de vista da engenharia costeira. Este tipo de transporte é responsável pela evolução da zona costeira e é nesta zona que o transporte de sedimentos se faz sentir com maior intensidade.

O transporte marítimo longitudinal pode ser entendido como o transporte de volumes consideráveis de sedimentos ao longo da costa, durante um determinado período de tempo, segundo a direcção da linha de costa.



A faixa costeira onde actua o transporte longitudinal pode ser classificada tipicamente de duas formas, costas rochosas, compostas por material consolidado e coeso, e costas arenosas, constituídas por material frágil, maioritariamente composto por areias, onde se verificam fortes acções de erosão. É este último tipo de costa que caracteriza o local escolhido como caso de estudo.

### 2.4.1. CAUDAIS DE TRANSPORTE

Os caudais de transporte de sedimentos na zona costeira são quantificados segundo uma direcção paralela à linha de costa. São grandezas que traduzem volumes que normalmente são calculados anualmente e expressos em  $m^3/ano$ .

A movimentação deste tipo de volumes é gerada devido ao efeito conjunto de ondas e correntes. As correntes marítimas podem ter origem em diversos fenómenos, no entanto no caso de estudo apenas foram consideradas as correntes induzidas pela ondulação, desprezando correntes com origem em marés ou correntes geradas por gradientes de densidade.

#### 2.4.1.1. CAUDAL RESULTANTE

O caudal resultante, referido na literatura anglo-saxónica como  $Q_{NET}$ , traduz o equilíbrio do caudal de sedimentos transportado segundo direcções paralelas à linha de costa, a longo termo, num determinado local. Na prática, corresponde ao saldo dos efeitos de erosão e de acreção verificados na zona costeira. Através da soma dos caudais de sentidos opostos, é quantificada a taxa de transporte e o sentido dominante.

$$Q_{NET} = Q_R + Q_L \quad (2.4)$$

Onde,

- $Q_R$  - Caudal resultante com sentido esquerda-direita;
- $Q_L$  - Caudal resultante com sentido direita-esquerda.

As variações do sentido predominante de transporte dos sedimentos são muitas vezes sazonais e convencionou-se que o transporte com o sentido para a direita,  $Q_R$ , é positivo, e  $Q_L$  toma valores negativos. A direcção e sentido destas grandezas são estipulados considerando um observador na costa a olhar para o mar (Figura 2.4).

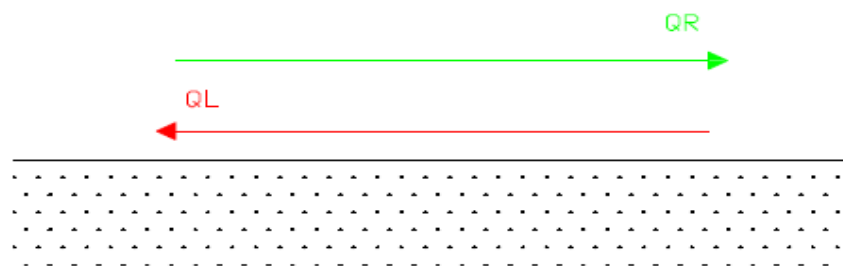


Figura 2.4 - Representação dos sentidos do caudal resultante

#### 2.4.1.2. CAUDAL TOTAL

O caudal anual total ou bruto,  $Q_{GROSS}$ , quantifica a movimentação total de volume de sedimentos, e é definido pela seguinte expressão:

$$Q_{GROSS} = Q_R + |Q_L| \quad (2.5)$$

O transporte é calculado não tendo em conta o sentido do mesmo, trabalhando apenas com valores positivos e devolvendo quantidades absolutas. Esta grandeza é muitas vezes utilizada para prever a deposição excessiva de sedimentos, importante na construção de canais marítimos e no dimensionamento de construções em enseadas.

Analisando as duas grandezas acima descritas, poderá ocorrer em determinados locais o caso em que o transporte bruto de sedimentos seja elevado e, ao mesmo tempo, o transporte líquido seja próximo, ou mesmo zero, consequência directa dos valores dos caudais dirigidos para a esquerda e para a direita serem iguais ou muito próximos. Daí a importância de estudar estas duas grandezas em separado.

### 2.5. FÓRMULA DE CERC

A fórmula de CERC, *Coastal Engineering Research Center*, serve de base para o modelo matemático GENESIS. Esta fórmula faz uso do método de fluxo de energia. De seguida é apresentada uma breve introdução da evolução da fórmula de CERC.

A componente longitudinal da energia de fluxo, designada por  $P_l$ , é dada pela seguinte fórmula:

$$P_l = (EC_g)_b \sin \alpha_b \cos \alpha_b \quad (2.6)$$

Onde a componente  $(EC_g)_b$  representa a energia de fluxo de onda gerada na zona de rebentação,  $E_b$ , energia de onda na zona de rebentação,  $C_{gb}$  a celeridade de grupo na zona de rebentação e  $\alpha_b$  o ângulo de incidência da onda na rebentação.

A energia de onda é dada pela seguinte fórmula:

$$E_b = \frac{\rho g H_b^2}{8} \quad (2.7)$$

Em que:

- $\rho$  - massa volúmica da água;
- $g$  - aceleração da gravidade;
- $H_b$  - altura de onda na rebentação.

O ângulo da onda incidente na rebentação,  $\alpha_b$ , é dado pela seguinte expressão:

$$\alpha_b = \alpha_{bg} - \alpha_{sg} = \alpha_{bg} - \tan^{-1} \left( \frac{dy}{dx} \right) \quad (2.8)$$

Sendo este a diferença entre o ângulo relativo a uma linha de controlo (linha de costa), com o eixo horizontal local,  $\alpha_{bg}$ , e o ângulo referido à mesma linha de controlo,  $\alpha_{sg}$ .

Na Figura 2.5 está esquematizada a relação escrita em cima.

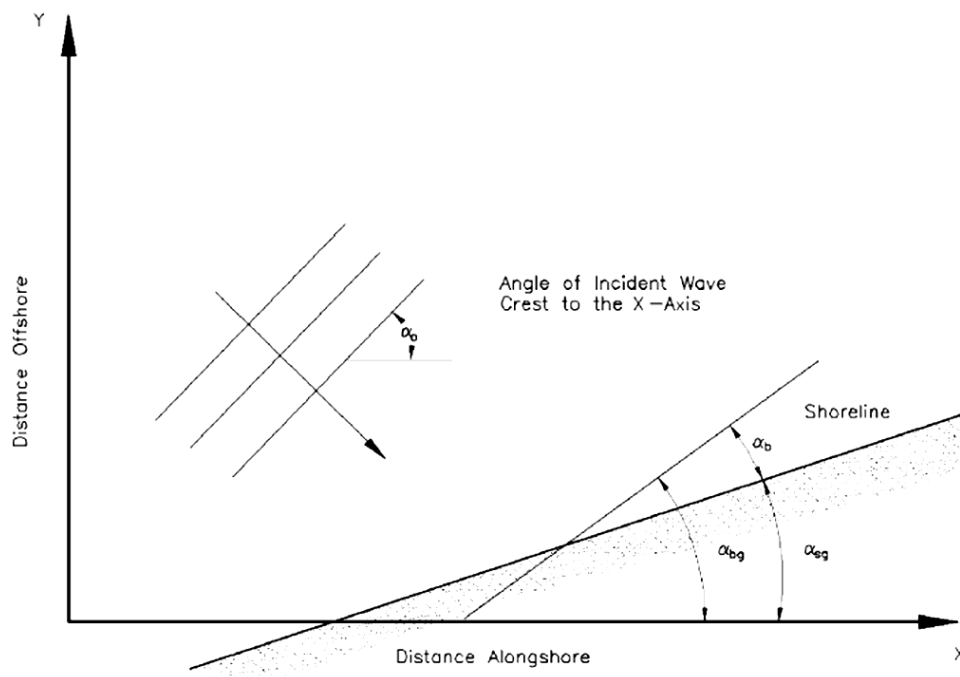


Figura 2.5 - Representação do ângulo de onda incidente na zona de rebentação (U.S. Army Corps of Engineers, 2006)

O factor  $\sin \alpha_b$ , na fórmula de energia de fluxo traduz a componente longitudinal da energia de fluxo, responsável pelo transporte de sedimentos.

A taxa de transporte longitudinal pode ser escrita sob a forma de taxa de transporte de peso imerso (*Immersed Weight Transport Rate*),

$$I_l = (\rho_s - \rho) g (1 - n) Q_l \quad (2.9)$$

Onde,

- $\rho_s$  - massa volúmica das partículas sólidas;
- $\rho$  - massa volúmica da água;
- $n$  - coeficiente de porosidade;
- $Q_l$  – caudal resultante de transporte longitudinal.

A fórmula de CERC, tal como a definição da componente longitudinal da energia de fluxo, parte do pressuposto que a taxa de volume de transporte longitudinal é directamente proporcional à componente longitudinal de energia de fluxo, mas afectada por um coeficiente adimensional  $K$ . A sua definição pode ser escrita da seguinte forma:

$$I_l = K P_l = K (EC_g)_b \sin \alpha_b \cos \alpha_b \quad (2.10)$$

Utilizando a expressão 2.8 a fórmula de CERC pode ser convertida para a taxa de volume de sedimentos.

$$Q_l = K \left( \frac{\rho \sqrt{g}}{16 k^{1/2} (\rho_s - \rho) (1 - n)} \right) H_b^{5/2} \sin(2\alpha_b) \quad (2.11)$$

Onde  $k$  é definido como,  $\frac{H_b}{h_r}$ , e representa o índice adimensional de altura de onda na rebentação.

A taxa de transporte de sedimentos é, como se pode concluir da expressão acima, proporcional ao ângulo de incidência da onda e à altura de onda na rebentação. Na Figura 2.6 é ilustrada a forma como a variação do ângulo de incidência da onda influencia o caudal resultante.

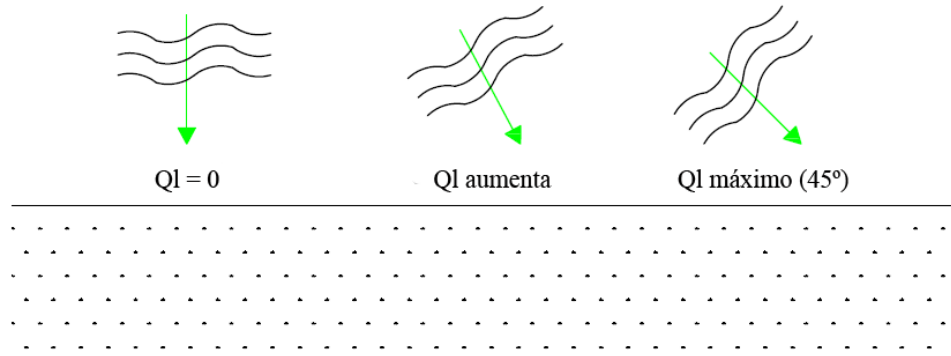


Figura 2.6 - Variação da taxa de transporte com o ângulo de incidência de onda

O factor adimensional  $K$  depende de variáveis ambientais, tais como o tamanho dos sedimentos transportados, ângulo de inclinação do plano da praia e declividade da onda. A calibração da fórmula CERC depende em muito do factor  $K$  (Komar, 1998).

Várias experiências laboratoriais e estudos feitos no próprio local foram desenvolvidos com o objectivo de comprovar e relacionar essas dependências do factor  $K$ . São aqui expostos alguns destes estudos.

Valle et al, 1993, realizaram um estudo no delta do rio Adra, Espanha. Nesta investigação foram utilizados dados provenientes de bóias e observações visuais de fotografias aéreas tiradas durante 30 anos. Segundo este estudo o factor  $K$  tende a decrescer quando valores de  $D_{50}$ , dimensão média dos sedimentos, crescem. A relação entre o factor  $K$  e o tamanho dos sedimentos está em muito condicionada ao local de estudo e à amostra de sedimentos estudada, variando com estes dois factores. No entanto, todos os resultados apontam para uma evidente baixa do factor  $K$  com o aumento do diâmetro dos sedimentos.

Embora se pense que, no cômputo geral, o coeficiente  $K$  diminui com o aumento do tamanho dos sedimentos, a natureza desta relação está longe de estar totalmente provada. Muito por força do recurso a um conjunto de dados limitado e da variabilidade inerente à medição das taxas de transporte longitudinal de sedimentos, o coeficiente  $K$  pode variar consideravelmente consoante o local de estudo (U.S. Army Corps of Engineers, 2006).

É também assumido que o factor  $K$  não depende apenas do diâmetro dos sedimentos, mas também da declividade da onda e da inclinação da praia. De facto, uma conclusão imediata é que um aumento da inclinação do plano da praia culmina num aumento do transporte litoral de sedimentos, pois um maior declive do talude da praia ajuda os sedimentos a vencer a força de atrito de fundo.

Kamphuis, 1991, numa série de experiências laboratoriais conclui que o transporte de sedimentos está directamente relacionado com o declive da praia e que a dimensão dos sedimentos pouco contribui para o seu cálculo.

Komar, 1998, baseado nas observações laboratoriais de Kamphuis, 1991, chegou à seguinte proporcionalidade para o factor  $K$ :

$$K \propto S^{0.75} \left(\frac{H_b}{L_\infty}\right)^{0.25} \left(\frac{H_b}{D_{50}}\right)^{-0.75} [\sin(2\alpha_b)]^{-0.4} \quad (2.12)$$

Onde,

- $S$  – declive da praia,
- $H_b$  - altura de onda na rebentação,
- $L_\infty$  - comprimento de onda ao largo,
- $\alpha_b$  – ângulo da onda incidente na rebentação,
- $D_{50}$  - diâmetro médio de sedimentos.

A expressão assinala a influência do declive da praia, da declividade de onda e do diâmetro médio dos sedimentos, onde a contribuição para o factor  $K$  segue a ordem referida.

Existem outros métodos para o cálculo de volumes transportados ao longo da costa, onde é introduzida a influência de correntes e da acção combinada de correntes e ondas. O *Coastal Engineering Manual* (U.S. Army Corps of Engineers, 2006), apresenta um exemplo deste tipo de método desenvolvido por *Walton* em 1980 e a principal diferença é a introdução da velocidade gerada pelas correntes na componente longitudinal da energia de fluxo:

$$P_l = \frac{\rho g H_b W V_l C_f}{\left(\frac{5\pi}{2}\right) \left(\frac{V}{V_0}\right)} \quad (2.13)$$

Onde,

- $W$  - largura da zona de rebentação;
- $V_l$  – corrente longitudinal medida num ponto na zona de rebentação;
- $V_0$  - velocidade teórica na zona de rebentação;
- $C_f$  - coeficiente de fricção que depende do número de *Reynolds* e da rugosidade do fundo.

Este tipo de métodos utiliza então a corrente longitudinal, ao contrário do ângulo de incidência da onda,  $\alpha_b$ , utilizado em modelos como o modelo de CERC. A vantagem está no facto de ser mais fiável a medição de correntes do que a medição do ângulo de incidência.

## 2.6. MODELOS DE TRANSPORTE LITORAL

A previsão da configuração da linha de costa ao longo do tempo constitui um objectivo essencial para o planeamento e gestão das zonas costeiras (Coelho, 2005). Diferentes tipos de modelos matemáticos prevêm a evolução da linha de costa durante um determinado período de simulação.

A classificação dos modelos matemáticos é feita consoante a complexidade de tratamento de dados, e conforme as escalas temporais e espaciais em que se insere a modelação. *Hanson, et al., 1991*, estabeleceram um diagrama que classifica os modelos segundo essas condicionantes. (Figura 2.7)

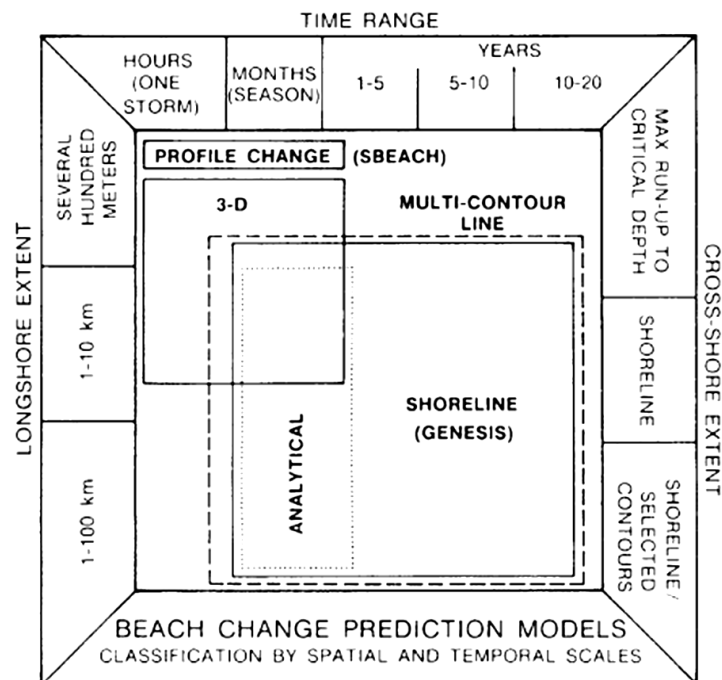


Figura 2.7 - Classificação de modelos numéricos em escalas temporais e espaciais, (Hanson, et al., 1991)

Segundo *Hanson, et al., 1991*, existem modelos de linha, modelos de n-linhas, modelos tridimensionais e modelos de processos macro. Os subcapítulos que se seguem descrevem uma breve introdução teórica a cada tipo de modelo.

### 2.6.1. **MODELOS DE PROCESSOS MACRO**

Os macro-modelos simulam tendências qualitativas da evolução da linha de costa sob condições simplificadas, para simulações de longa duração e extensões geográficas de grande dimensão. Esta categoria de modelos inclui soluções numéricas e analíticas da equação que traduz a evolução da linha de costa sob condições de onda constantes (Hanson, et al., 1991).

### 2.6.2. **MODELOS TRIDIMENSIONAIS**

Os modelos tridimensionais encontram-se ainda numa fase de desenvolvimento e são ainda pouco utilizados no mundo da engenharia. Têm como objectivo estudar as variações do fundo nas direcções perpendicular e longitudinal, e, envolvem coeficientes empíricos pouco explorados, como fricção de fundo, mistura turbulenta e transporte de sedimentos (U.S. Army Corps of Engineers, 2006).

Este tipo de modelo requer informação detalhada e precisa do local de estudo e para observações a longo prazo tornam-se pouco eficazes, pois requerem muitos recursos computacionais para tratar toda a informação.

### 2.6.3. **MODELOS DE N-LINHAS**

Se a evolução da praia é representada por mudanças em mais do que uma curva batimétrica, o modelo é designado de modelo de n-linhas, modelos de múltiplas linhas. Este tipo de modelos tem em conta tanto a distribuição perpendicular à costa dos sedimentos aquando do transporte longitudinal, como o transporte perpendicular de sedimentos (Hanson, et al., 1991).

Tal como os modelos tridimensionais, os modelos de n-linhas padecem do mesmo mal, são pesados a nível computacional e a sua aplicação é bastante condicionada por este facto.

### 2.6.4. **MODELOS DE LINHA**

Quando o problema a ser resolvido envolve escalas temporais anuais, escalas espaciais da ordem das dezenas de quilómetros e a principal preocupação está directamente relacionada com alterações na linha de costa, então o tipo de modelo mais indicado é o modelo de linha.

A ideia principal num modelo de linha parte do princípio de que numa praia em que o perfil se encontra em equilíbrio, este se mantém inalterado durante a simulação, podendo avançar ou recuar



perpendicularmente à linha de costa, movendo-se paralelamente a si próprio, bastando apenas um ponto para localizar o perfil (Figura 2.8). De facto o nome deste tipo de modelos advém dessa mesma aproximação, pois o ponto simulado na secção perpendicular corresponde à linha de costa simulada.

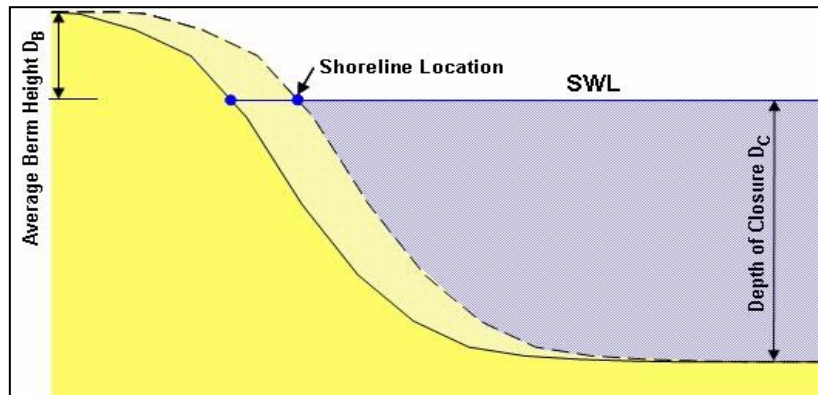
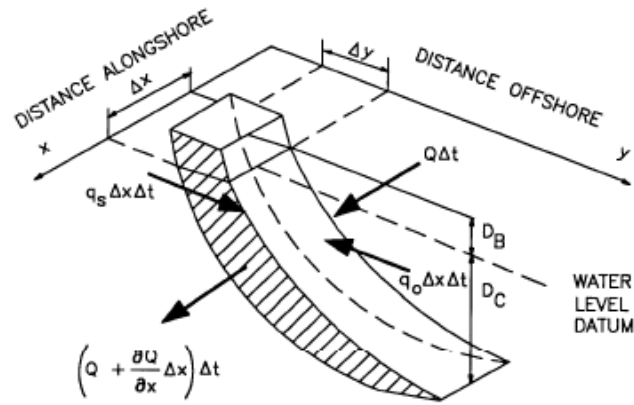


Figura 2.8 - Representação da movimentação da linha de costa em modelos de linha, ([www.coastalwiki.org](http://www.coastalwiki.org))

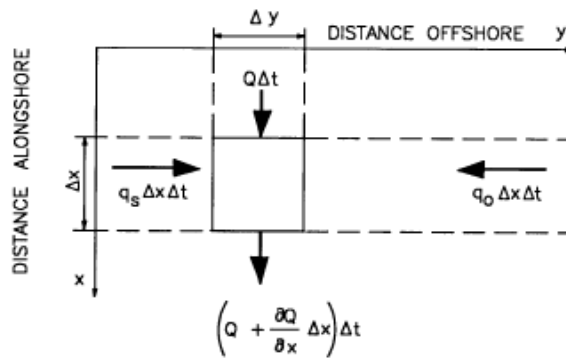
Este tipo de modelo reproduz o transporte causado pela rebentação de ondas, ou seja, pelas correntes que decorrem da rebentação, não tendo, assim, em conta o transporte produzido por correntes de maré, ventos ou outros agentes causadores.

A definição da cota de berma ( $d_B$ ) e profundidade de fecho ( $d_C$ ) é importante para definir os limites do perfil que se move paralelamente. A cota de berma é definida como o limite do lado de terra, enquanto a profundidade de fecho pode ser entendida como o limite do lado do mar onde para lá do qual não se verificam variações do perfil da praia, correspondendo ao ponto a partir do qual não existem movimentações aluvionares.

O modelo de linha parte do princípio de que o transporte de sedimentos é feito paralelamente à costa entre células de entrada e saída definidas no perfil da praia. Como se pode verificar através da Figura 2.9, os avanços e recuos da linha de costa são quantificados pelas grandezas  $\Delta y$  e  $\Delta x$  que representam esse intervalo longitudinal.



a. Cross-section view



b. Plan view

Figura 2.9 – Esquema representativo do cálculo da evolução da linha de costa através de modelos de linha, (Hanson, et al., 1991)

O incremento de volume de sedimentos acumulados numa secção elemental de dimensões estipuladas é dado pela expressão:

$$\Delta V = (d_b + d_c)\Delta x\Delta y \quad (2.14)$$

Onde o transporte de sedimentos é distribuído uniformemente ao longo da faixa activa, limitada pela profundidade de fecho e cota de berma.

O modelo de linha baseia-se na equação de conservação de sedimentos num volume de controlo e na equação de volume de transporte litoral, podendo ser escrito da seguinte forma:

$$\frac{\Delta y}{\Delta t} + \frac{1}{d_b + d_c} \left( \frac{\Delta Q_l}{\Delta x} \pm q \right) = 0 \quad (2.15)$$

Onde,

- $\Delta x$  – intervalo longitudinal;
- $\Delta y$  - intervalo perpendicular;
- $Q_l$  - caudal resultante de transporte longitudinal;
- $q$  – transporte de sedimentos de entrada;
- $\Delta t$  - intervalo de tempo.

#### 2.6.4.1. EXEMPLOS DE MODELOS DE LINHA

Henriques, 2007, realizou um estudo que visava analisar o impacto que uma extensão de 400m do molhe Norte do porto da Figueira da Foz iria provocar no trecho de costa localizado imediatamente a jusante do molhe Sul do porto até ao esporão de Costa de Lavos, precisamente a zona em estudo neste trabalho. O modelo utilizado para as simulações desenvolvido por *WL | Delft Hydraulics, Deltares*, foi o UNIBEST-CL+ (*UNiform BEach Sediment Transport CoastLine*). Este modelo assenta nas equações de continuidade da teoria dos modelos de uma linha.

UNIBEST-CL+ é definido pela entidade que o desenvolveu como uma ferramenta eficaz para modelar o transporte de sedimentos ao longo da costa e a sua morfodinâmica. Através de equações de continuidade e de mobilidade calcula o balanço sedimentar gerado pelo transporte longitudinal ao longo da costa, que acaba por ser traduzido pela migração da linha de costa (Kramer, 2005).

O modelo GENESIS é outro modelo fundamentado na teoria de linha. É este o modelo que irá simular a evolução da linha de costa do caso em estudo e uma alusão mais extensa e completa a este modelo é referida no capítulo 4.3

#### 2.7. ESTUDOS ANÁLOGOS

*Hanson*, 1987, estudou a influência da sequência de ondas como dados de entrada no modelo GENESIS, num trecho de costa hipotético que continha um esporão. Nesta análise de sensibilidade *Hanson* simulou cenários onde as ondas eram ordenadas por ordem crescente e decrescente de direcção e altura de onda, bem como cenários onde a ordem de ondas era aleatória em cada série de dados, mas onde a energia de fluxo se mantinha constante para os diferentes cenários.

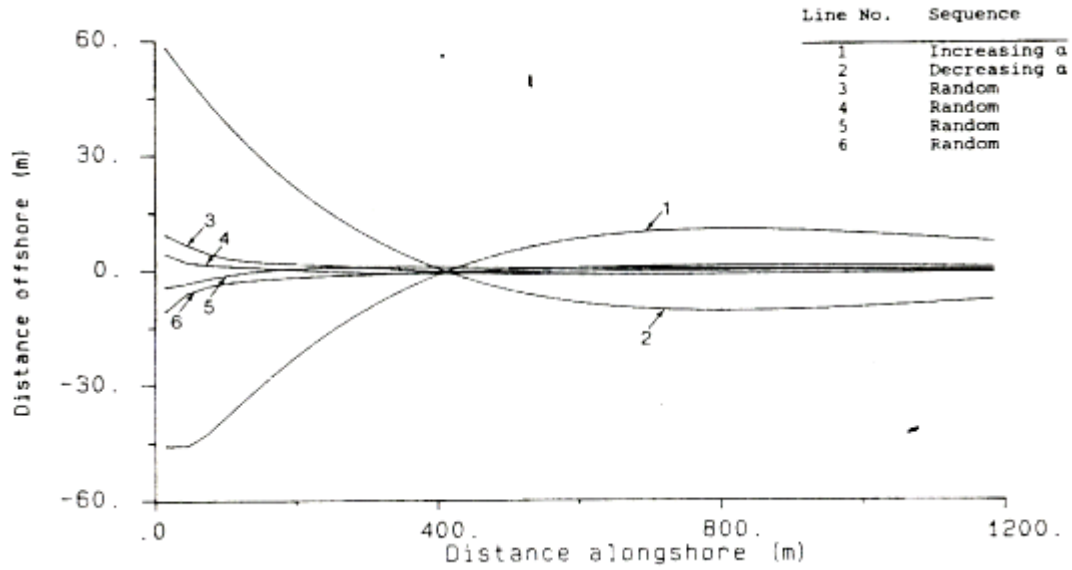


Figura 2.10 - Influência da sequência da direcção de onda na evolução da linha de costa, (Hanson, 1987)

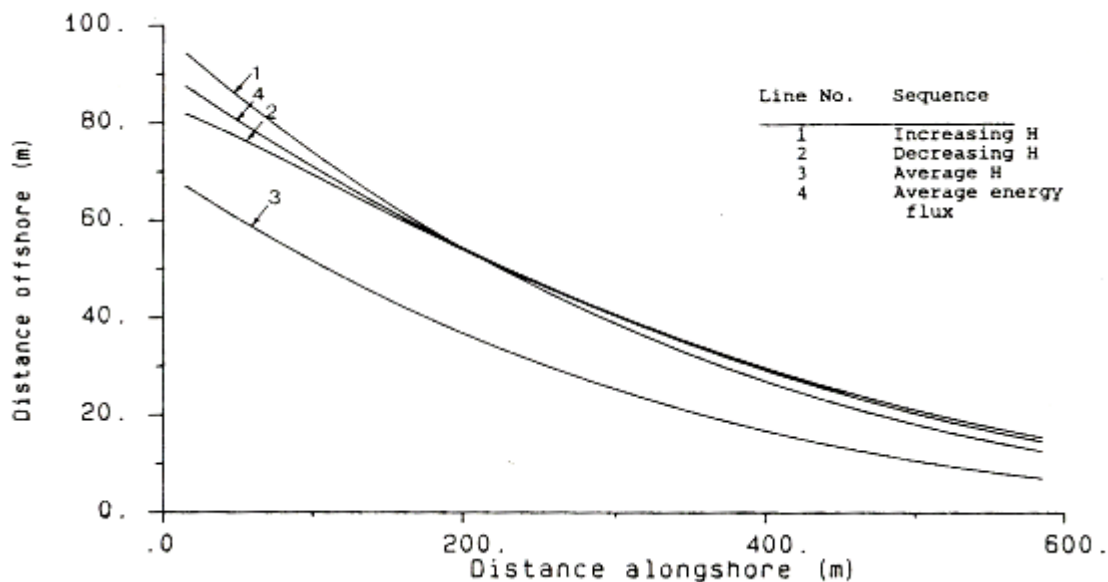


Figura 2.11 - Influência da sequência da altura de onda na evolução da linha de costa, (Hanson, 1987)

A Figura 2.10 e a Figura 2.11 representam os resultados obtidos por *Hanson*.

Como conclusão do seu estudo *Hanson* afirma que a evolução da linha de costa é extremamente sensível à ordem de ângulos de incidência de onda, no entanto uma variação da altura de onda acompanhada pela média ponderada da energia de fluxo podem ser usadas para futuros estudos, desde que a altura de onda seja razoavelmente independente da direcção de onda.

*Le Mehaute, et al., 1983*, realizaram um estudo onde o principal objectivo era a análise quantitativa da classificação da agitação marítima em função de mudanças verificadas na linha de costa, e, no fundo propor regras que sintetizassem processos de definição de parametrização de climas de agitação para futuros estudos de evolução de linha da costa, onde fossem utilizados dados sinópticos de

agitação. Através de uma análise de sensibilidade analítica concluíram que os dados a serem utilizados numa simulação a longo prazo de linha de costa necessitam de ter uma boa resolução na definição dos intervalos de ângulos de onda incidente, e que a posição final da linha de costa está dependente da duração dos diferentes eventos de ondas e da sequência que lhes é imposta. Nesta análise de sensibilidade chegaram também à conclusão de que quanto maior for o período de simulação, mais a linha de costa simulada irá tender para a sua posição de equilíbrio e que esta posição está directamente relacionada com o ângulo da onda incidente.

Após a análise de sensibilidade *Le Mehaute, et al., 1983*, utilizaram o método estatístico de *Monte Carlo* (classe de algoritmos matemáticos que dependem de amostras aleatoriamente repetidas), para simular as mudanças verificadas na linha de costa quando lhe eram impostas diferentes séries de ondas incidentes, gerando um histórico de posições de linha de costa. Deste estudo chegaram à conclusão de que uma discretização fina da altura de onda é pouco importante, desde que seja utilizada a média de energia de fluxo de onda, e que a ordem sequencial dos eventos onde se faz variar a direcção de onda é mais importante que uma sequência de eventos de onda incidente onde se fez variar as alturas de onda, afectando menos a posição da linha de costa.

A grande diferença dos estudos de *Hanson, 1987*, e de *Le Mehaute, et al., 1983*, para o estudo aqui exposto é que estes estudos ao variarem uma das características de onda, mantiveram as outras características constantes durante o tempo de simulação. Factores como os domínios temporais e espaciais, bem como as obras presentes nos casos de estudo utilizados pelos dois autores, são também diferentes daqueles utilizados neste trabalho.



### 3. CASO DE ESTUDO, FIGUEIRA DA FOZ - COSTA DE LAVOS

#### 3.1. ENQUADRAMENTO E CONSIDERAÇÕES GERAIS

O trecho em estudo está localizado entre o molhe Sul da foz do rio Mondego e o esporão localizado na povoação de Costa de Lavos. Na Figura 3.1 está representada a área onde foram implementados os domínios de cálculo dos modelos matemáticos.

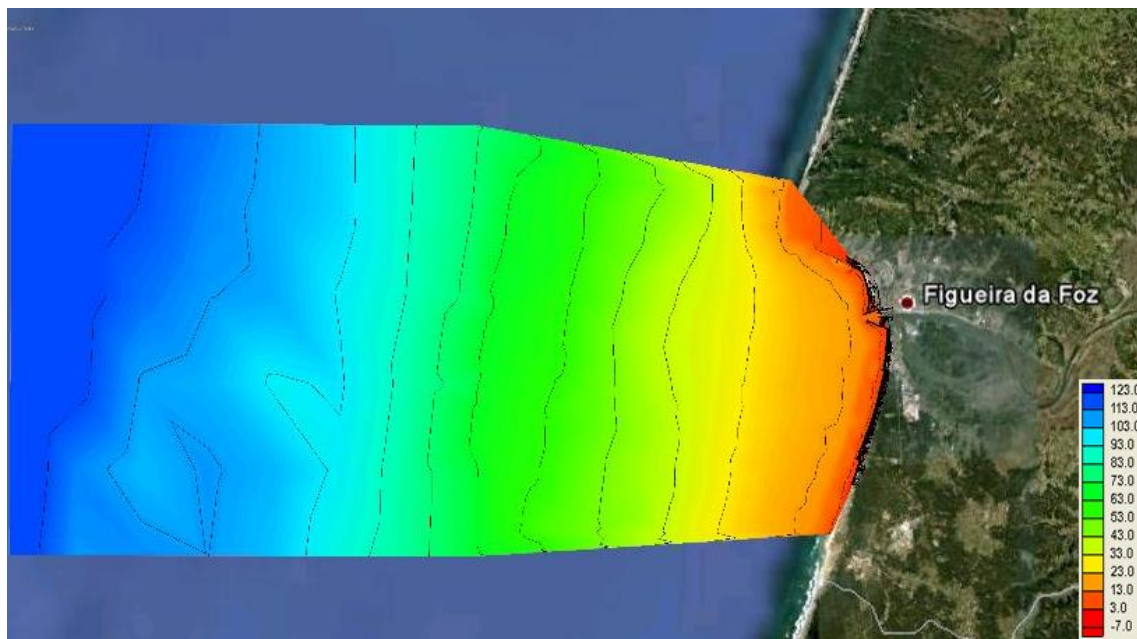


Figura 3.1 – Localização e representação das áreas de implementação dos modelos matemáticos

Esta imagem foi gerada pelo programa informático SMS, responsável pela esquematização da informação batimétrica, em conjunto com o *Google Earth*. A legenda no canto inferior direito está expressa em metros.

A bacia do rio Mondego tem uma orientação dominante Nordeste-Sudoeste, com uma área total de 6644 km<sup>2</sup>, onde o rio tem um comprimento de 234 km. Esta é uma das bacias portuguesas com maior utilização de recursos hídricos. Ao longo do seu percurso estão implantadas barragens que contribuem para o aproveitamento hidroelétrico, das quais se destacam três, Aguieira, Raiva, Fronhas e o açude de Coimbra.

Dragagens de manutenção do acesso marítimo ao porto da Figueira da Foz são comuns. Com efeito, as exigências de tirantes de água da navegação que demanda o porto e a insuficiente capacidade de auto-manutenção da barra da Figueira na sua configuração actual, “obrigam” a autoridade portuária a recorrer a dragagens que, em regra, não têm contemplado a reposição nas praias a sul. Estas dragagens têm incidido sobre diferentes zonas (barra exterior, canal através do anteporto e zona

submersa imediatamente a norte da cabeça do molhe norte), e assumido intensidade muito variável de ano para ano. Durante alguns anos foi também exercida a extracção de areia na parte emersa da praia da Figueira, na zona adjacente ao molhe norte (Teixeira, 2006).

Extracção de inertes nos cursos de água e próximo do litoral, as dragagens nos estuários e sobretudo a retenção de sedimentos pelas barragens acaba por produzir uma significativa redução da quantidade de areias que chegam ao litoral.

Os dois molhes do porto da Figueira da Foz foram construídos na década de 60 (Figura 3.2), tendo esta construção provocado uma evidente reorientação da linha de costa naquela zona.



Figura 3.2 – Construção do molhe norte do porto da Figueira da Foz, 1961, (Carvalho, et al., 1966)

Os dois molhes construídos desempenharam um papel idêntico ao de dois esporões, no que toca a morfologia territorial, bloqueando numa fase inicial, todo o transporte sedimentar. Verificando-se acumulação de sedimentos a norte e erosão a sul dos molhes.

Vicente, 1990, realizou um estudo da evolução costeira devida a obras portuárias para o caso da Figueira da Foz. Neste estudo foi feita uma análise do ritmo de enchimento da praia da Figueira da Foz, dispondo de levantamentos de níveis de preia-mar e baixa-mar ao longo de 26 anos.

Através deste estudo foi possível entender que o processo de enchimento da praia se encontrava concluído em 1980 e que o avanço final da linha de PM na zona do molhe Norte era de 440 m, perfazendo um total de 60 hectares de zona emersa em toda a praia. Após este período de enchimento o molhe Norte deixou de funcionar como um “tampão”, embora parcial, do transporte de sedimentos para sul e a Costa de Lavos passou a receber uma quantidade de sedimentos mais



elevada, tendendo para uma posição de equilíbrio. Na década de 80 foi construído um campo de esporões, cinco, na zona de Cova-Gala com o objectivo de estabilizar o trecho Cabedelo, Cova-Gala.

A figura Figura 3.3 estabelece a ligação entre o espaço físico em estudo e o espaço virtual criado para ser utilizado na modelação com o modelo GENESIS. De referir, que o modelo apenas permite a implantação dos esporões segundo a direcção perpendicular da malha da grelha que o define, sendo uma consequência imediata desta limitação a de que a orientação dos esporões no modelo não irá corresponder à realidade, sendo estes representados por rectas.

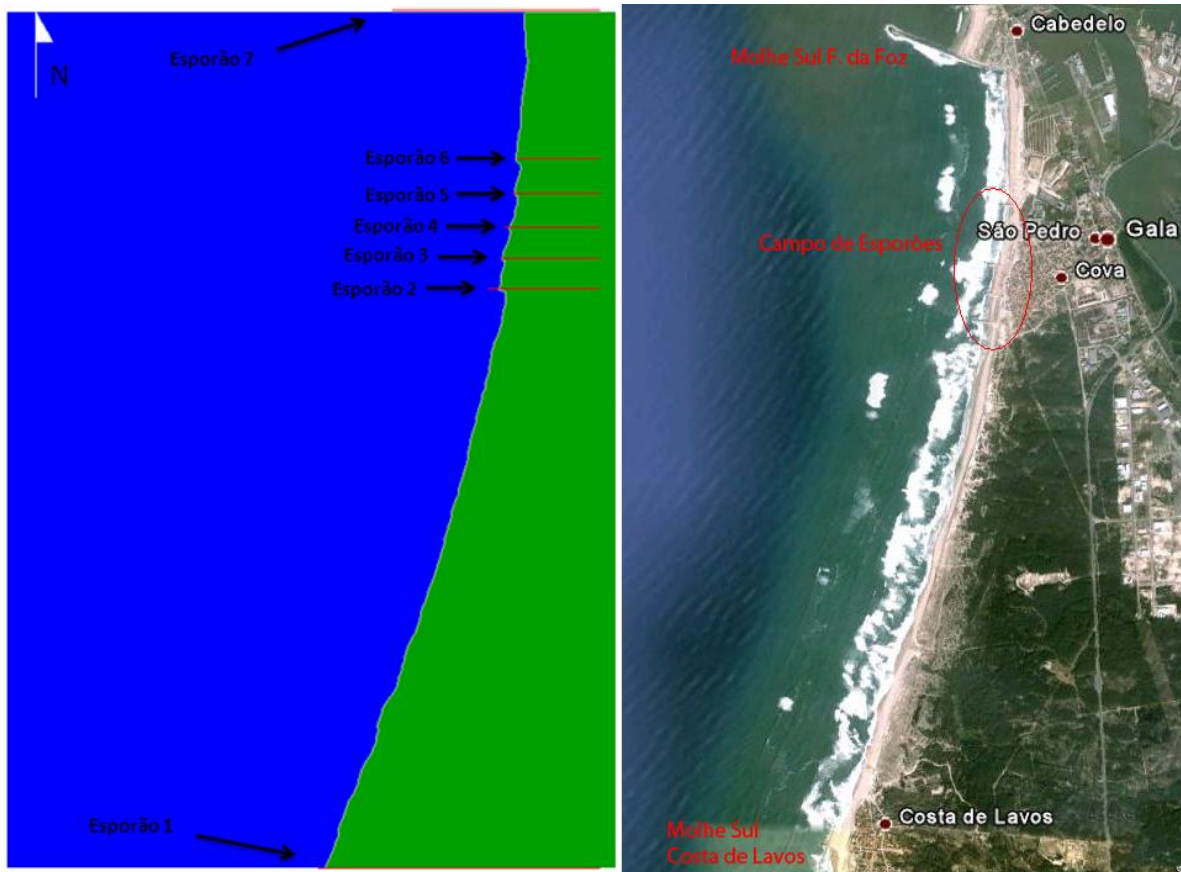


Figura 3.3 – Classificação do local de estudo, domínio matemático versus domínio real

No Anexo A está exposto o quadro que caracteriza a totalidade dos esporões representados na figura acima. Todas as outras obras/defesas não foram consideradas no modelo, pois em pouco iriam afectar a evolução da modelação.

### 3.2. DADOS DO CLIMA DE AGITAÇÃO

Em 1966 J. J. Reis de Carvalho e J. P. Barceló realizaram um estudo sobre agitação marítima na costa Oeste de Portugal. Neste estudo utilizaram como base, observações feitas na Figueira da Foz desde 1954 até 1960.

As características da agitação, nomeadamente a altura de onda e período, foram medidas através de um teodolito, cronometrando os movimentos de subida e descida da haste de uma bóia presa por uma corrente a uma poita colocada no fundo, situada a uma distância de 1400m do ponto de observação (a torre do relógio na Av. Marginal na Figueira da Foz).

A observação da direcção da ondulação foi feita estabelecendo a coincidência do fio horizontal do retículo do taqueómetro com a imagem da crista nas zonas de observação. Este tipo de observação é bastante rudimentar, e os erros induzidos pelas observações são demais evidentes. Nos tempos de “hoje” existem diversos métodos e aparelhos que captam este tipo de informação de forma mais eficiente e expedita, alguns deles estão representados na Figura 3.4.

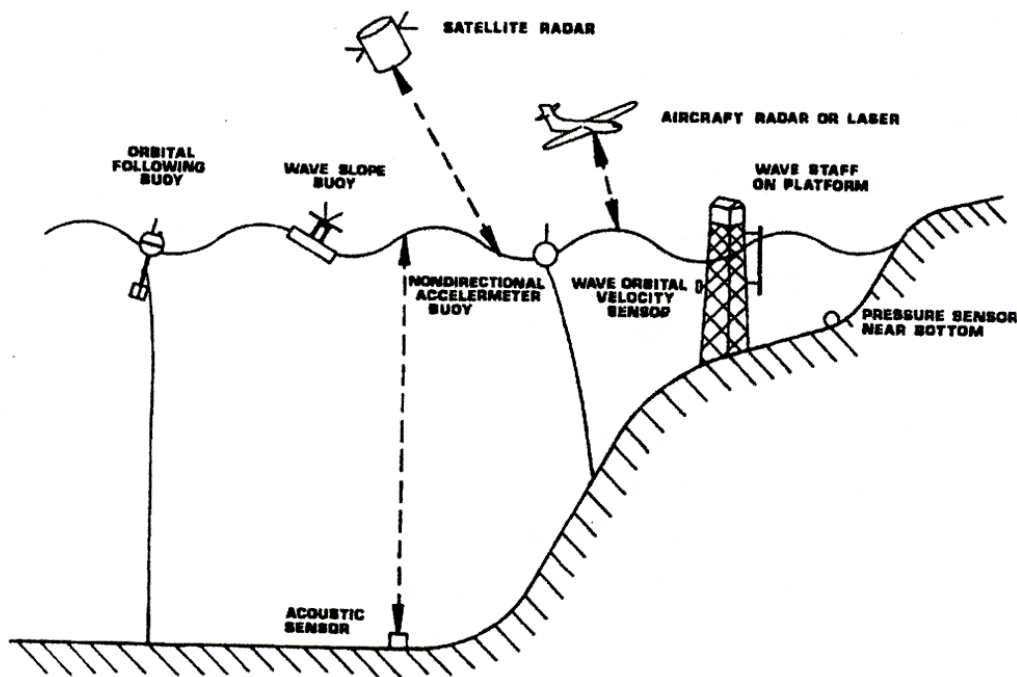


Figura 3.4 - Métodos de registo de dados de onda, (Komar, 1998)

Barata, et al., 1996, realizaram um estudo estatístico sobre a caracterização da agitação marítima ao largo do Cabo Mondego e zona de Aveiro. Através de informação anual recolhida por duas bóias-ondógrafo direccionais, estacionadas ao largo do Cabo Mondego e Aveiro, foram registados valores de altura de onda ( $H$ ), período ( $T$ ) e direcções de onda ( $\theta$ ).

As séries de dados emitidas pela bóia-ondógrafo do Cabo Mondego iniciaram-se em Julho de 1990 e terminaram em Julho de 1993. Como regra os registos tiveram uma duração de 20 minutos, intervalados de 3 horas (Barata, et al., 1996).

Esta bóia encontra-se estacionada a uma profundidade de 90m. A esta profundidade é possível afirmar que a agitação não é influenciada pelo fundo, ou seja, que esta informação corresponde a uma agitação ao largo. Associada à definição da agitação ao largo está o conceito de águas profundas. Considera-se que uma onda se desloca em águas profundas quando a profundidade é superior a metade do comprimento de onda. Na prática e segundo Barata, et al., 1996, aceita-se que as ondas são ainda pouco afectadas pelo fundo até profundidades iguais a um terço do comprimento de onda.

De facto ao considerar-se um valor de 13s para o período de onda, valor que na distribuição do período de pico não é excedido em mais de 80% das ocorrências, para o caso em estudo, obtém-se o correspondente a 88m de profundidade, equivalente a um terço do comprimento de onda. Neste contexto, é seguro afirmar que os registos da bóia do Cabo Mondego correspondem a medições ao largo.

As ondas geradas pelo vento utilizadas neste estudo são o produto final da análise efectuada por Barata, et al., 1996. No Quadro 3.1 estão representadas as 6 ondas características resultantes dessa análise.

Quadro 3.1 - Ondas características ao largo do Cabo Mondego

Onda	Altura H (m)	Período T (s)	Rumo $\theta$ ( $^{\circ}$ )	Frequência (%)
1	1,75	12	315	50
2	2,25	12	303,75	30,02
3	3,75	12	281,25	7,54
4	3,75	12	326,25	9,8
5	4,75	15	315	1,64
6	6,25	15	315	1

A frequência referida no quadro retrata a percentagem de ocorrência das diferentes ondas numa amostra anual.

O critério estabelecido para a selecção das ondas representativas foi constituído recorrendo ao cálculo do transporte litoral num perfil transversal numa zona de batimetria regular. As condições seleccionadas devem produzir o mesmo transporte anual e a mesma distribuição ao longo do perfil transversal que o conjunto das ondas que representam o clima de agitação registado ao largo do Cabo Mondego, cujo transporte e distribuição são previamente calculados para o mesmo perfil (Barata, et al., 1996).

A selecção das ondas representativas incidiu sobre as classes identificadas no decurso do tratamento estatístico dos dados dos ondógrafos direccionais, enquanto que para determinar o transporte de sedimentos desenvolveu-se um modelo unidimensional de transporte de sedimentos. No Final Barata, et al, pretendiam seleccionar um conjunto de condições de agitação para servir de base às simulações efectuadas com o sistema de modelos utilizados. Para seleccionar as ondas

representativas recorreram à análise dos dados de agitação e dos resultados do sistema de modelos do transporte litoral no perfil.

Os valores dos caudais sólidos integrados no perfil resultantes das condições de agitação representativas são os seguintes:

Quadro 3.2 - Caudais característicos da faixa costeira em estudo

$Q_{\text{Norte}}$ (m <sup>3</sup> /ano)	5,9x10 <sup>4</sup>
$Q_{\text{Sul}}$ (m <sup>3</sup> /ano)	1,4 x10 <sup>6</sup>
$Q_{\text{Resultante}}$ (m <sup>3</sup> /ano)	1,3 x10 <sup>6</sup>

O caudal resultante irá desempenhar um papel importante na calibração do modelo GENESIS. Esta função está descrita no subcapítulo 4.3.4.

### 3.3. CONJUNTURA DE REFERÊNCIA E CENÁRIOS DE CÁLCULO

Foram criados diferentes cenários de estudo com o intuito de expor, analisar e concluir, da forma mais clara possível, os objectivos finais deste trabalho. Estes mesmos cenários foram numerados alfabeticamente e as suas especificidades estão descritas no seguinte quadro.

Quadro 3.3 - Cenários de estudo

<b>Cenários</b>	<b>Descrição</b>	<b>Tempo de Simulação</b>
<b>Cenário A</b>	A série de dados é distribuída por ordem crescente de altura de onda (H).	20 anos
<b>Cenário B</b>	A série de dados é distribuída por ordem decrescente de altura de onda (H).	20 anos
<b>Cenário C</b>	A série de dados é distribuída por ordem crescente de ângulo de incidência de onda ( $\theta$ ).	20 anos
<b>Cenário D</b>	A série de dados é distribuída por ordem decrescente de ângulo de incidência de onda ( $\theta$ ).	20 anos
<b>Cenários E, F, G</b>	As séries de dados são distribuídas aleatoriamente.	20 anos

As séries de dados dos diferentes cenários foram construídas através das 6 ondas representativas (Quadro 3.1), espelhando a frequência de ocorrência de cada onda, num ano fictício de registo de dados. Objectivamente, corresponde a um recuo do estudo realizado por Barata, et al., 1996, mas considerando apenas as ondas características.

Esse ano fictício foi depois ordenado por ordem crescente ou decrescente de características de onda, utilizando o software *Microsoft Excel*, dando origem aos cenários A, B, C e D. Já para os cenários E,

F e G, foi criada uma rotina, também no *Microsoft Excel*, que permitiu elaborar séries de dados anuais completamente aleatórias e diferentes entre si.

Em suma foram estabelecidos sete cenários diferentes, todos com uma ordem diferente de ondas incidentes, a partir de um ano de dados. Os resultados apresentados no subcapítulo 5.2, consideram horizontes temporais de simulação de 2, 4, 6, 12 e 20 anos.

### 3.4. DOMÍNIO DE CÁLCULO

A planta do local em estudo foi desenvolvida através da informação contida em cartas com elementos topográficos do Instituto da Água e hidrográficos do Instituto Hidrográfico.

O domínio topográfico, disponível em formato digital, ficheiro do tipo *Cad*, corresponde a uma compilação de vários levantamentos topográficos à escala de 1:2000 realizados em 2001. Nesta compilação está representada toda a informação topográfica e uma linha de costa, que corresponde ao nível das águas do mar, resultado do nível de maré no momento em que o levantamento topográfico foi realizado.

A informação hidrográfica corresponde a levantamentos hidrográficos realizados pelo Instituto Hidrográfico. Foi utilizada uma carta, que continha informação mais detalhada da zona em estudo a uma escala de 1:30 000 e um ficheiro informático com informação batimétrica ao largo.

A Figura 2.1 retrata dois tipos de informação utilizados para desenvolver o domínio de cálculo.

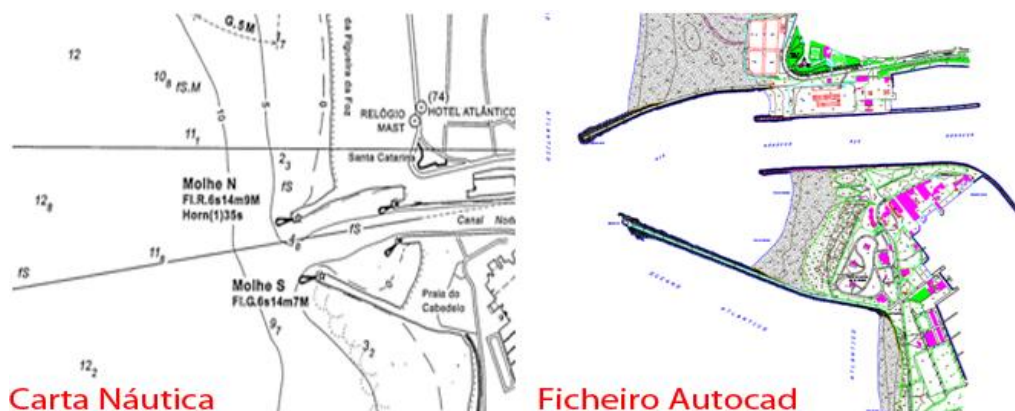


Figura 3.5 – Excerto da representação dos dados topográficos e batimétricos, zona da foz do rio Mondego

O tratamento, compilação, correlação e georeferênciação desta informação foi resolvido através do software *AutoCad*. Com este software foi possível realizar alterações de escala de forma a produzir um único ficheiro coeso e com a informação necessária.

Verificou-se que existia uma falta de informação relativa à posição da linha de costa, posição a ser tomada como inicial aquando da modelação matemática. Este problema foi resolvido traçando uma linha paralela à cota de +2ZT, de forma a traçar a linha correspondente ao zero topográfico. A distância da translação efectuada foi medida tendo em conta os dois levantamentos, carta náutica e ficheiro AutoCad do Instituto Hidrográfico, tentando conciliar da melhor forma as informações dos dois levantamentos.

Toda esta informação foi depois tratada utilizando o software da *Aquaveo, SMS, Surface Modeling System*. A função deste software foi a de produzir um ficheiro de entrada para o software CEDAS, que tivesse toda a informação topográfica e hidrográfica devidamente georeferenciada e tridimensional, ou seja, contendo informação relativa a profundidades.

## 4. MODELAÇÃO DO CASO DE ESTUDO

A modelação de todo o projecto foi efectuada usando o software CEDAS, *Coastal Engineering Design & Analysis System*. Este apresenta uma colecção completa de módulos de design e análise de projectos de engenharia costeira.

Dentro do leque de módulos disponibilizado pelo software foi utilizado o módulo NEMOS, *Nearshore Evolution MOdeling System*. Este módulo oferece uma série de códigos e modelos matemáticos que funcionam como um sistema que simula, a curto ou longo prazo, a evolução da linha de costa, respondendo a condições que lhe são impostas, tais como estruturas costeiras e outro tipo de actividades de engenharia.

Os principais modelos matemáticos que o módulo NEMOS disponibiliza e aqui utilizados, são o STWAVE e o GENESIS. O modelo STWAVE utiliza uma representação 2-D de diferenças finitas de uma equação de balanço espectral simplificada, para simular a propagação do clima de agitação do largo para profundidades mais perto da costa. Uma descrição mais detalhada deste modelo é descrita no subcapítulo 4.2.1. O modelo GENESIS é o modelo responsável por calcular a evolução da linha de costa, causada principalmente pela acção de ondas. A formulação teórica e prática deste modelo é apresentada com mais detalhe no capítulo 4.3.

O seguinte organograma explica de uma forma sumária todo o processo de modelação realizado através do módulo NEMOS e quais as ligações entre os modelos utilizados.

Todo este processo é explicado nos próximos capítulos e as convenções de ângulos referidas no organograma podem ser consultadas no Anexo B.

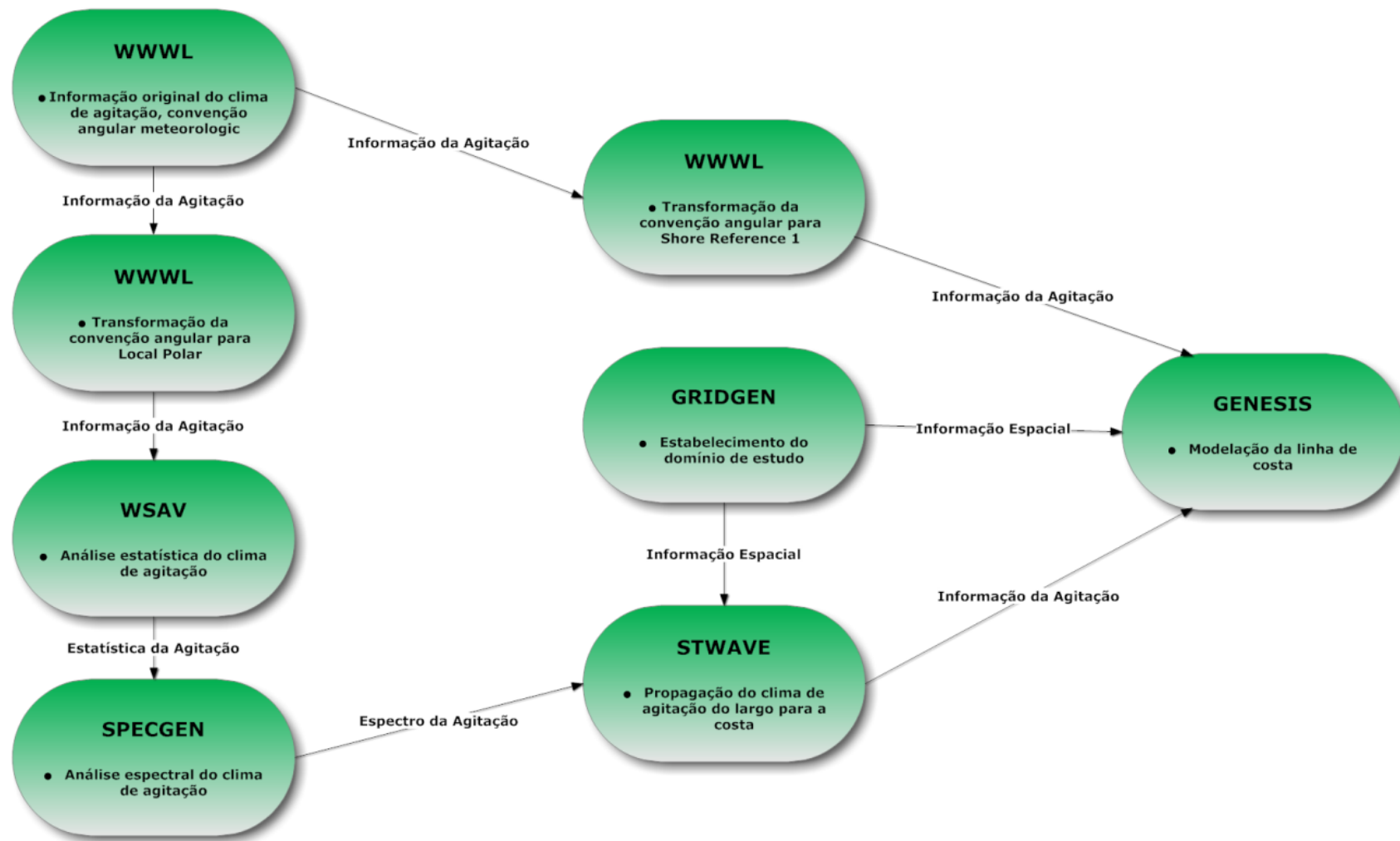


Figura 4.1 – Organograma representativo da modelação



## 4.1. PREPARAÇÃO DOS DADOS DE MODELAÇÃO

### 4.1.1. GRID GENERATOR

A ferramenta *Grid Generator* do módulo NEMOS, para além de importar toda a informação batimétrica e topográfica, permite o estabelecimento das malhas de cálculo.

A bóia-ondógrafo estava estacionada a uma profundidade de 90m, tendo este factor condicionado a construção da grelha do modelo STWAVE. Para que os dados da bóia pudessem ser utilizados de uma forma coerente a fronteira poente da grelha foi implantada a profundidades ligeiramente superiores à da bóia, num intervalo que estabelecido entre os 90 e 95m.

Após uma análise de sensibilidade de definição da grelha, onde se fizeram variar, tanto a origem como a resolução da malha, a grelha para o modelo STWAVE acabou por ser definida com as seguintes características:

- Origem da grelha do canto sudeste;
- Grelha rectangular;
- Malha quadrada com 25m de lado.

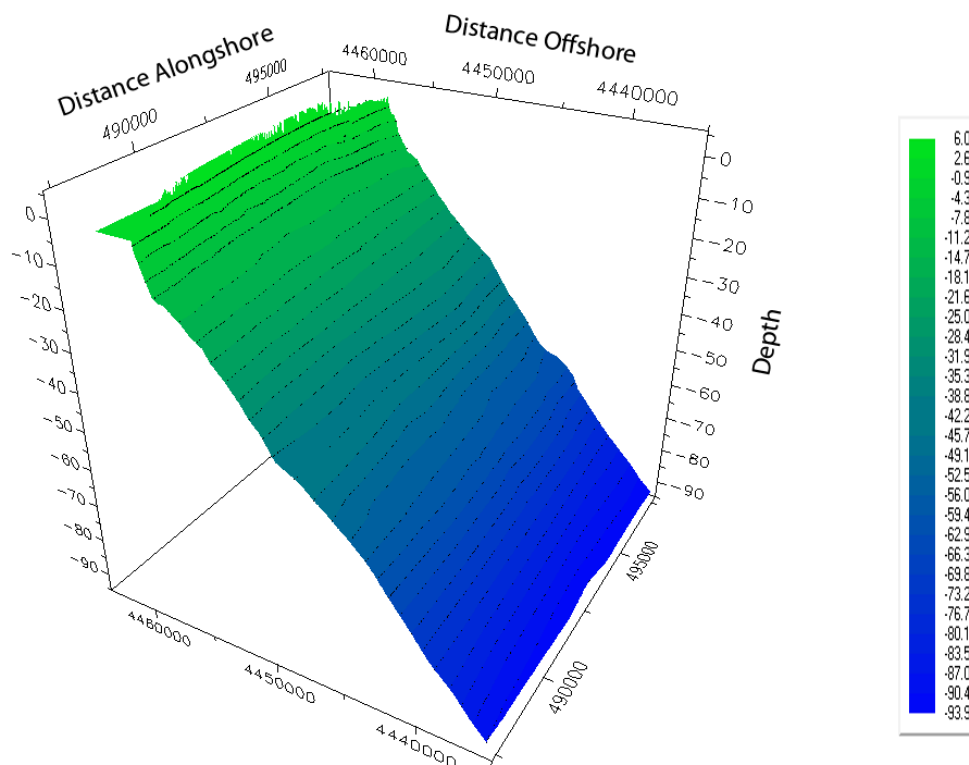


Figura 4.2 – Representação em 3D da grelha do modelo STWAVE, adaptado do software CEDAS

A Figura 4.2 mostra o domínio de cálculo do modelo STWAVE a três dimensões. A imagem transparece a noção das distâncias em causa, ilustrando tanto a distância ao longo da costa (*Distance Alongshore*) como a distância perpendicular à costa (*Distance Offshore*) e a profundidade (*Depth*). No total, a grelha do STWAVE abrange uma área de de 26250 hm<sup>2</sup>.

A grelha do modelo GENESIS foi definida de Sul para Norte, formando uma régua de 5600m de comprimento com espaçamento de 25m. Este espaçamento foi definido tendo em conta as obras presentes no trecho em estudo, pois o software impõe que as estruturas sejam definidas nos nós da malha de cálculo.

A definição do espaçamento das duas grelhas foi definida tendo em conta a área a ser simulada, a velocidade de processamento do computador utilizado, uma vez que uma malha mais refinada aumentaria em muito o tempo de simulação, e a restrição imposta pelo software de que o espaçamento da malha do modelo GENESIS não pode ser inferior ao espaçamento definido para a malha da grelha do modelo STWAVE.

O código *Grid Generator* permite ainda a colocação de estações, que tanto funcionam como pontos de registo de dados para o modelo STWAVE, produto final de simulação, como dados de entrada para o modelo GENESIS. Essas mesmas estações foram colocadas ao longo da curva batimétrica de 12m de profundidade, profundidade de fecho.

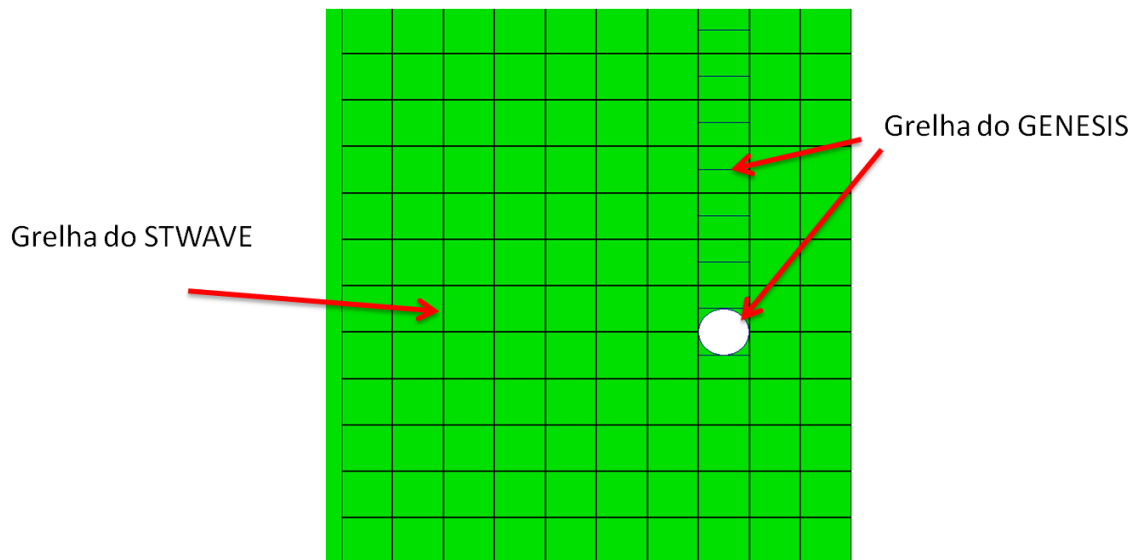


Figura 4.3 – Representação de um zoom nas grelhas dos modelos STWAVE e GENESIS, adaptado do software CEDAS

Na Figura 4.3, está representada uma ampliação das grelhas dos modelos matemáticos na origem do modelo GENESIS. A grelha do modelo STWAVE está representada na figura pela quadrícula. A grelha do modelo GENESIS é definida pelo ponteados preto visível ao longo do lado vertical direito da imagem.

#### 4.1.2. **WWWL**

Toda a informação relativa aos diferentes cenários de estado de agitação ao largo foi introduzida no software utilizando o editor WWWL, *Waves, Winds and Water Levels*.

Os diferentes cenários de simulação foram criados assumindo registos diários espaçados de 6 horas, respeitando a frequência de ocorrência de cada onda descrita no Quadro 3.1. Na prática retrocedeu-se na análise feita por Barata, et al., 1996, utilizando-se apenas as ondas representativas do clima de agitação e não os registos da bóia.

Diferentes modelos utilizam diferentes referenciais para ficheiros de entrada. O editor WWWL permite a mudança desses referenciais impondo uma rotação, modificando o ângulo da onda incidente. No Anexo B estão representadas as convenções angulares utilizadas pelos diferentes modelos.

O WWWL permite também a introdução de informação relativa à localização da bóia, profundidade, e o tipo de sistema de coordenadas utilizado (coordenadas locais).

#### 4.1.3. **WSAV**

A aplicação WSAV, *Wave Station Analysis and Visualization*, permite efectuar uma análise estatística da série de dados representativa do clima de agitação, e a visualização dos resultados gerados, através de diagramas, histogramas ou rosas.

Para além de ser obrigatória a sua utilização, esta aplicação permitiu verificar se a assumpção feita para a criação dos diferentes cenários, cumpria a frequência de ocorrência de cada onda. A Figura 4.4 e Figura 4.5 representam a análise estatística efectuada pelo WSAV num histograma e num diagrama de rosa, e confirmam as frequências de ocorrência do Quadro 3.1.

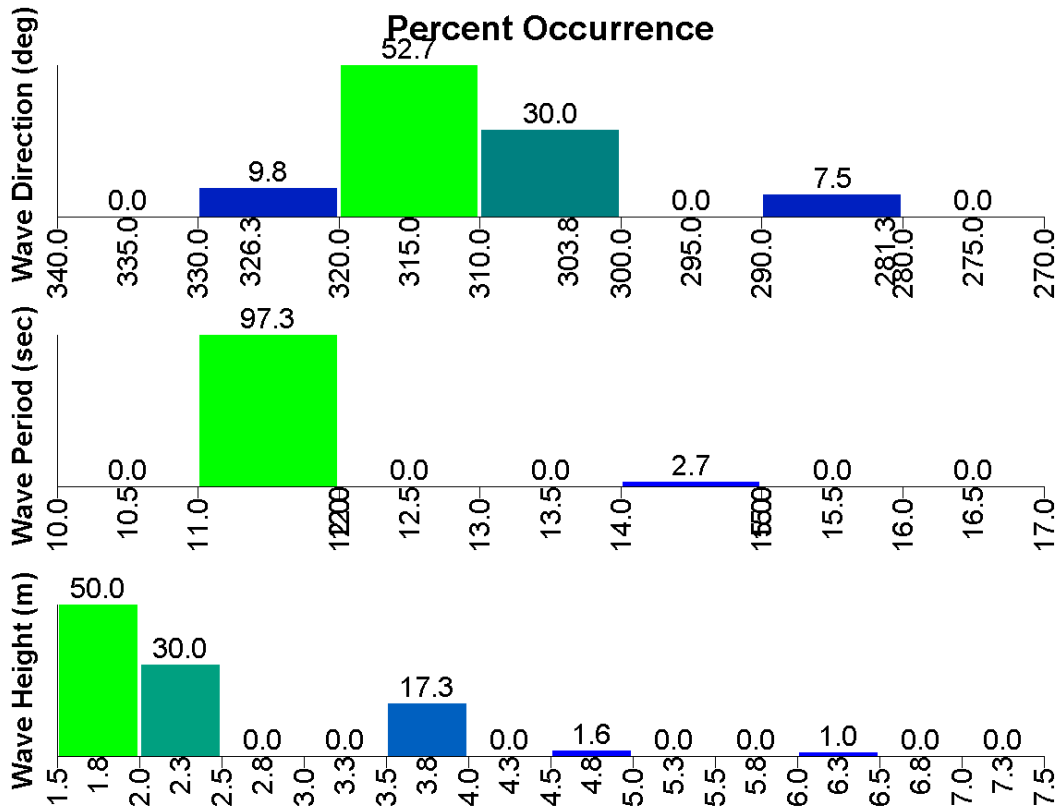


Figura 4.4 – Histograma de percentagem de ocorrência de alturas, direcção e período de onda, CEDAS

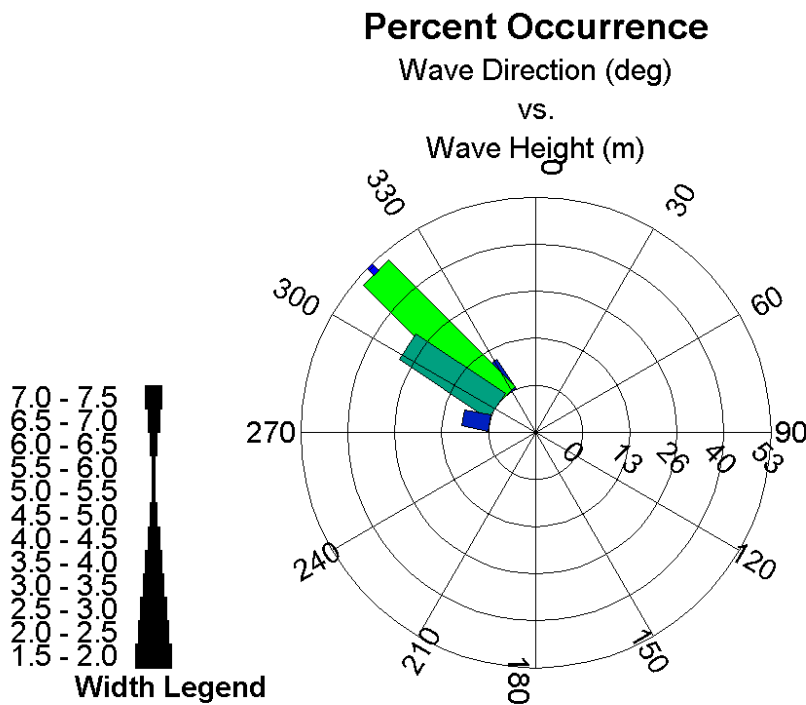


Figura 4.5 – Diagrama de rosa representativo das direcções de onda, CEDAS

#### 4.1.4. SPECGEN

WSAV produz um ficheiro do tipo indexado onde estão formuladas as ondas que representam o estado de agitação. Cabe depois à aplicação SPECGEN criar os espectros de densidade de energia relativos a cada onda.

A consideração do rumo das ondas conduz ao chamado espectro direccionado da agitação marítima, que caracteriza a distribuição da energia da agitação pelos períodos e pelas direcções de propagação (Mota Oliveira, n.d.). Na prática trata-se de uma transformação do domínio do tempo para o domínio da frequência.

A análise espectral permite a caracterização da superfície livre do mar enquanto processo estocástico, possibilitando a descrição da distribuição de energia dum estado de agitação pelos períodos e direcções das diferentes ondas (Sampaio, 2008).

O estudo e análise de modelos paramétricos espectrais é delicado e extenso. Aqui é apresentada uma breve explicação do tipo de equação espectral utilizada pela aplicação SPECGEN.

O espectro empírico utilizado pelo SPECGEN é o TMA, *Texel, Marsen, and Arsloe*, nome das fontes de dados usadas no seu desenvolvimento. TMA apresenta-se como uma variação do espectro de energia *Jonswap*, tendo em conta a influência da profundidade da coluna de água finita dada pela função de *Kitaigorodoski* (U.S. Army Corps of Engineers, 2006). No Anexo C estão ilustrados os espectros produzidos pelo SPECGEN para cada onda característica.

Este espectro empírico é usado para determinar a distribuição da densidade de energia em forma de frequência. Enquanto que a distribuição direccionada da densidade de energia é realizada através de uma função *cosseno* em função do desvio angular da direcção de pico da onda espectral.

#### 4.2. PROPAGAÇÃO DO CLIMA DE AGITAÇÃO

O objectivo de modelos que façam a transformação de ondas entre condições ao largo e condições junto à costa é a de descrever quantitativamente a mudança dos parâmetros da onda, tais como a altura de onda, o período, a direcção e espectro.

A uma profundidade relativamente grande, tipicamente valores acima de 40 m, as características da onda mantêm-se constantes numa escala de quilómetros, mas para profundidades menores essas mesmas características podem variar numa questão de metros. Factores como a batimetria, nível da água e correntes são os principais responsáveis pela transformação da onda que se propaga do largo para a costa (Smith, et al., 2001).

### 4.2.1. STWAVE

Existem vários modelos de propagação, na literatura, nomeadamente em *Smith, et al., 2001*, pode-se encontrar diversos trabalhos publicados onde é utilizado o modelo STWAVE. Outro modelo largamente utilizado é o SWAN desenvolvido pela Universidade de *Delft, Holanda*. *Sampaio, 2008*, efectua um estudo com o objectivo da aplicação e análise do desempenho do modelo na caracterização da agitação marítima na zona adjacente a Pinheiro da Cruz em regime não estacionário.

STWAVE, *Steady-State Spectral Wave Model*, é o modelo responsável pela propagação do clima de agitação de condições ao largo (bóia-ondógrafo) para a costa, *nearshore*, desenvolvido e usado pelo *U.S. Army Corps of Engineers*. O seu nome advém do facto de se assumir uma condição estacionária do vento em tempo suficiente para que as ondas sejam limitadas pelo *fetch* ou tenham atingido o estado completo de desenvolvimento (ECD), *Steady-State*, e do facto de os dados de entrada serem espectros de energia de onda.

O objectivo de modelos que façam a transformação de ondas entre condições ao largo e condições junto à costa é a de descrever quantitativamente a mudança dos parâmetros da onda, tais como a altura de onda, o período, a direcção e espectro. A Figura 4.6 representa a forma como o software CEDAS interage com o modelo.

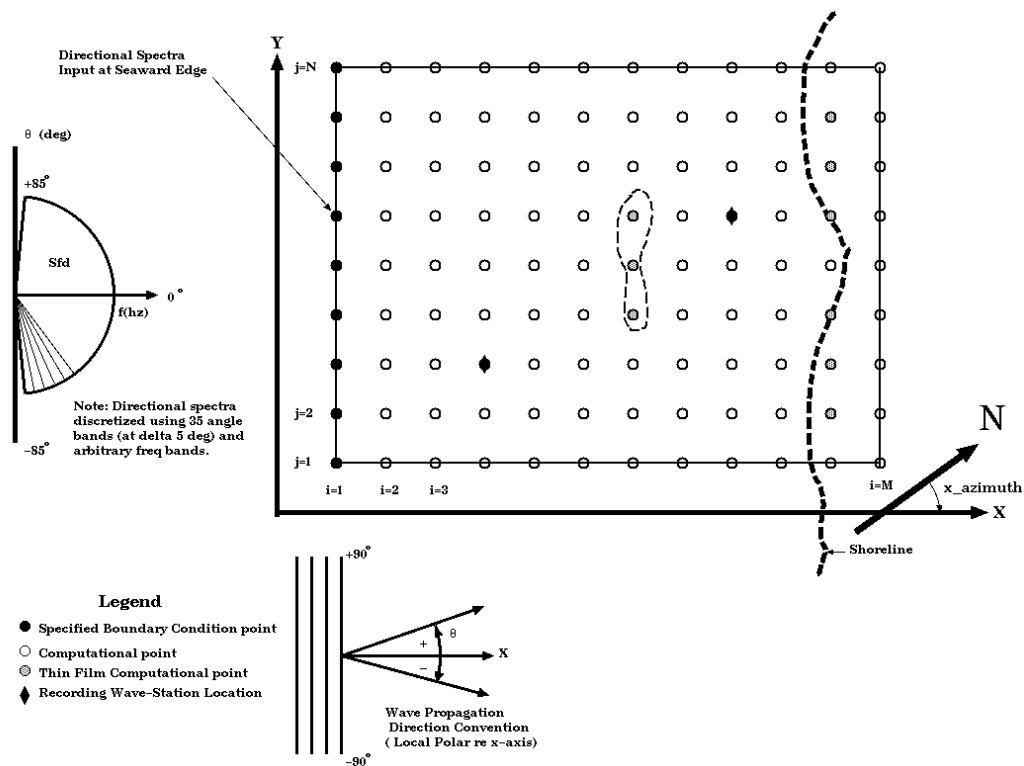


Figura 4.6 – Representação do funcionamento do modelo STWAVE no software CEDAS, adaptado de CEDAS

O STWAVE é um modelo de diferenças finitas, formulado numa grelha de células quadradas. A grelha do STWAVE funciona sobre um sistema de coordenadas local e está orientada para a costa, onde a sua origem é fixada na fronteira ao largo. O ficheiro contendo informação relativa ao espectro direccional de cada onda é colocado na fronteira oceânica, de forma constante, e é depois propagado até às estações onde é recolhida a informação do cálculo do valor da distribuição das alturas, dos períodos significativos, das direcções predominantes e da distribuição espectral de energia.

Este modelo inclui a simulação dos fenómenos de difracção (simplificada), refracção e empolamento das ondas por efeito da batimetria e da interacção com correntes, e geração de ondulação por acção do vento. No caso em estudo apenas serão tidas em conta as correntes induzidas por ondas geradas pelo vento, pelo que correntes com origem noutros fenómenos, como marés, não serão calculadas pelo modelo. Para além disso, o modelo contempla, ainda, a simulação dos processos de rebentação e da interacção onda-onda e *white capping* (carneiros) responsáveis pela redistribuição e dissipação de energia num campo de ondas em desenvolvimento.

O modelo STWAVE é um modelo do tipo *half-plane*, ou seja, apenas efectua a propagação em direcção à costa, não contempla portanto fenómenos de refracção de ondas por parte da costa, por estruturas marítimas ou pela inclinação do fundo que dê origem a ondas com direcções com orientações entre os  $85^{\circ}$  e os  $275^{\circ}$ , segundo a convenção representada na Figura 4.6.

O modelo não inclui dissipação de energia por atrito no fundo e as correntes são mantidas constantes ao longo da coluna que água.

### 4.3. GENESIS

#### 4.3.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

GENESIS, *GENERALized model for Simulating Shoreline change*, foi desenvolvido pelo *U.S. Army's Corps of Engineers*. É um modelo numérico que utiliza teoria de linha, simulando a alteração da linha de costa numa determinada região. O GENESIS é capaz de determinar os avanços e recuos da linha de costa, mantendo a forma do seu perfil que avança perpendicularmente à costa. Assim, torna-se apenas necessário um único ponto do perfil para determinar toda a secção perpendicular que lhe está associada.

GENESIS é um sistema de modelos numéricos que permite a simulação de mudança litoral durante um período de meses a anos, causada principalmente pela acção das ondas. A escala física do comprimento horizontal do modelo varia de um a dez quilómetros. O sistema é generalizado no sentido em que o modelo pode ser usado para simular a mudança litoral sob uma grande variedade de configurações de praia e de estruturas na costa, especificadas pelo utilizador (Hanson, 1987).

A rebentação das ondas incidentes a um dado ângulo, provocam um transporte longitudinal ao longo da linha de estudo, fazendo avançar ou regredir a mesma. O modelo GENESIS pode ser considerado como sendo dois modelos num só, um que propaga as ondas desde a zona de rebentação até à linha de costa, e outro, que é responsável pelo cálculo do transporte longitudinal de sedimentos e pela alteração da linha de costa.

O volume de sedimentos em circulação é calculado em função da fórmula de CERC, mas com uma correcção para o comportamento das ondas por difracção na proximidade das estruturas. O programa utiliza um valor único da profundidade de fecho para toda a costa, apesar de na proximidade de grandes estruturas, como quebramares e esporões extensos, o clima de agitação ser mais calmo e consequentemente a profundidade de fecho ser menor (Coelho, 2005). O modelo GENESIS utiliza uma grelha unidimensional para a representação dos resultados após corridas as simulações

#### 4.3.1.1. ESTRUTURA DO MODELO

A equação para o transporte longitudinal que o GENESIS utiliza, assenta em três características fundamentais da onda incidente, a altura, o período e a direcção. A fórmula empírica que rege o modelo GENESIS é dada pela seguinte expressão:

$$Q_l = H_{bs}^2 C_{gb} \left( a_1 \sin 2\alpha_b - a_2 \cos \alpha_b \frac{\partial H_{bsig}}{\partial x} \right), \quad (4.1)$$

Onde os parâmetros adimensionais  $a_1$  e  $a_2$  são respectivamente,

$$a_1 = \frac{K_1}{16 \left( \frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right) (1 - n) (1.416)^{5/2}} \quad (4.2)$$

$$a_2 = \frac{K_2}{8 \left( \frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right) (1 - n) m (1.416)^{7/2}} \quad (4.3)$$

Onde,

- $K_1$  e  $K_2$  - coeficientes empíricos de calibração do modelo;
- $m$  - declive do fundo, desde a linha de costa até à profundidade onde o transporte litoral deixa de ser significativo;
- $\rho_s$  - massa volúmica de sólidos;
- $\rho$  - massa volúmica da água.



A constante de valor 1.416 presente dos coeficientes  $a_1$  e  $a_2$ , serve para converter os parâmetros  $K_1$  e  $K_2$ , de modo a que estes deixem de estar ligados a valores de  $H_{rms}$  e passem a ser referidos em relação à altura significativa ( $H_{sig}$ ).

O primeiro termo da equação do GENESIS, é conhecido como a fórmula de CERC (equação 2.11),  $H_{b\ sig}^2 C_{gb} (a_1 \sin 2\alpha_b)$ , trata o transporte litoral produzido pela rebentação de ondas incidentes, enquanto o segundo termo,  $H_{b\ sig}^2 C_{gb} \left( a_2 \cos \alpha_b \frac{\partial H_{b\ sig}}{\partial x} \right)$ , está relacionado com a altura de onda na rebentação e com o gradiente de transporte litoral,  $\frac{\partial H_{b\ sig}}{\partial x}$ . Este segundo termo tem especial importância nos casos em que na vizinhança existem estruturas marítimas que provocam oscilações na altura de onda, ou seja quando estamos perante fenómenos de difracção.

O modelo utiliza o método das diferenças finitas no cálculo do transporte longitudinal e na migração da linha de costa. Tal como ilustrado pela Figura 4.7,  $y_i$  e  $Q_i$  são calculados ao longo da linha de costa, alternadamente no tempo. Como condição inicial, a posição da linha de costa,  $y_i$ , é dada no centro de cada célula de cálculo. Com esta informação, e, conhecidos os parâmetros de rebentação de onda, o caudal de transporte de sedimentos,  $Q_i$ , é calculado em cada ponto da grelha do GENESIS, dando a posição da linha de costa ao longo da praia através da equação 2.14 (Hanson, 1987).

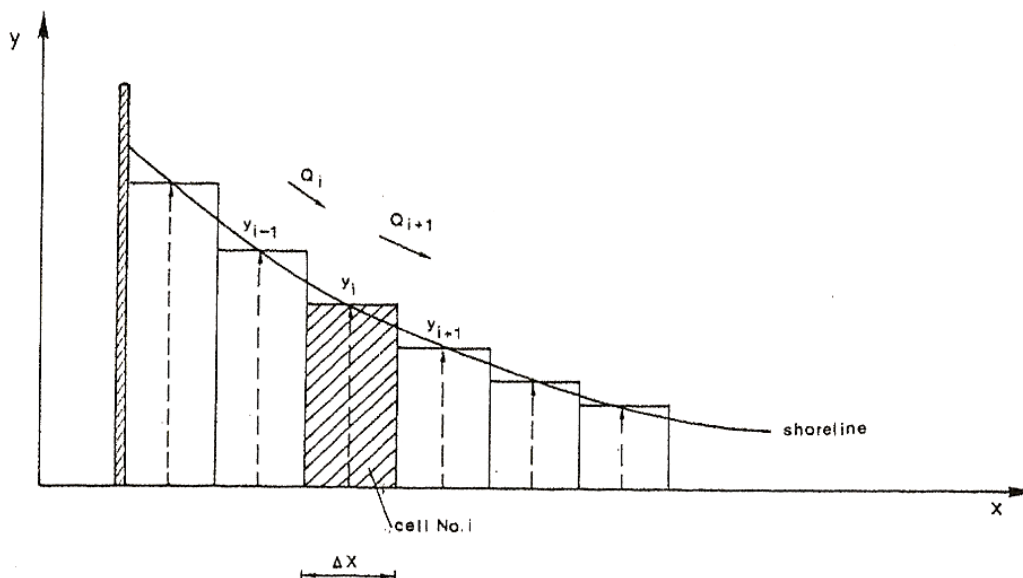


Figura 4.7 - Representação do método de diferenças finitas cálculo do transporte longitudinal, (Hanson, 1987)

A refração de onda no modelo GENESIS é feita através da lei de *Snell*:

$$k_1 \sin \alpha_1 = k_2 \sin \alpha_2 \quad (11.4)$$

Onde  $k_i$  é o número de onda e  $\alpha_i$  é o ângulo da onda incidente relativo à curva batimétrica. Os índices 1 e 2 são referentes a duas profundidades diferentes.

O facto de o modelo assumir que os contornos de fundo se movem paralelamente à linha de costa pode levar a uma instabilidade numérica ou refração de onda deficiente, assim o modelo calcula uma curva batimétrica que respeita a tendência de todas as outras curvas, e utiliza esta linha como referência para a refração local. Esta linha acaba por ser o resultado final de um filtro de todas as mudanças abruptas que se verificam na linha de costa, mas que ao mesmo tempo respeita todas as suas características.

#### 4.3.1.2. CONDIÇÕES DE FRONTEIRA

Os limites físicos que permitem confinar a área de estudo, facilitam e objectivam a análise do projecto. Todos os cálculos relativos à evolução da linha de costa estão dependentes da formulação das condições de fronteira. Neste sentido, o estabelecimento das condições de fronteira num projecto é um passo importante na modelação de um trecho de costa, mas nem sempre a sua definição é fácil.

No modelo GENESIS, as condições de fronteira estão directamente relacionadas com o transporte longitudinal. A forma mais expedita de formular condições de fronteira é a de adoptar estruturas existentes no domínio que permitam o estabelecimento destes limites de cálculo.

Analiticamente segundo U.S. Army Corps of Engineers, 2006, existem três tipos de fronteiras comuns,

- $Q_l = 0$  , inexistência de transporte sedimentar;
- $\frac{dQ_l}{dx} = 0$  , transporte de sedimentos livre;
- $Q_l \neq 0$  , transporte de sedimentos parcial.

Na prática, morfologicamente as condições de fronteira podem ser representadas pelos seguintes locais ou construções marítimas:

- Esporões, quebramares, ou outro tipo de estrutura que bloqueie por completo o transporte de sedimentos (*gated*);
- Locais onde o transporte de sedimentos seja conhecido, normalmente são zonas onde a linha de costa se mantém inalterada durante largos períodos de tempo (*pinned beach*);
- Locais onde se saiba exactamente o fluxo de transporte, tais como aberturas em quebramares ou locais onde se efectue a bombagem de sedimentos por sucção contínua (*moving beach*).

Nem sempre existem condições de fronteira de implantação evidente, ou porque o trecho em estudo não possui limites físicos claros, ou porque os dados disponíveis são incoerentes. Nestes casos o engenheiro terá de ponderar as condições de fronteira usando o bom senso.

#### 4.3.1.3. CAPACIDADES E LIMITAÇÕES DO MODELO

O modelo GENESIS foi desenhado para prever a tendência do posicionamento da linha de costa a longo prazo, partindo de uma posição inicial. Como resumo das principais características do modelo são de seguida enumeradas as suas capacidades e limitações.

##### Limitações:

- O transporte longitudinal é o único responsável pela movimentação da linha de perfil da costa, não estando previstas situações onde o transporte perpendicular possa ser dominante, tais como situações de tempestade;
- O perfil de fundo não se altera com o tempo e move-se paralelamente a si próprio;
- Para lá da profundidade de fecho,  $d_c$ , assume-se que o perfil não sofre alterações e deixa de se movimentar;
- Ao mesmo tempo que a parte imersa do perfil se movimenta perpendicularmente a si próprio, a parte emersa acompanha esse movimento, por outras palavras a altura  $d_B$  acompanha a altura  $d_c$ ;
- O transporte longitudinal é provocado única e exclusivamente por ondas e correntes induzidas pelas ondas, e varia consoante com o ângulo de incidência das mesmas. O facto de o modelo apenas considerar correntes geradas por ondas e não ter em conta outro tipo de correntes, tais como, de maré ou induzidas por ventos locais, faz com que este seja muitas vezes insuficiente para uma simulação precisa;

- O modelo pressupõe a existência de uma forte tendência na evolução da linha de costa, onde o transporte longitudinal é a principal causa dessa tendência. Caso não exista essa tendência na evolução da linha de costa, o modelo não pode ser aplicado;
- O modelo não prevê também pequenas alterações provocadas por estruturas marítimas e mais especificamente a formação de tômbolos, embora já haja variantes deste modelo que prevêem a criação desta formação arenosa, como o GENESIS-T disponibilizado pela empresa *Veri-Tech*.

#### Capacidades:

- Vasta e arbitrária combinação entre construções de protecção e abrigo marítimas, como esporões, quebramares, quebramares destacados, muros e revestimentos longitudinais aderentes e alimentações de praia;
- Capacidade de criação de estruturas compostas, por exemplo em forma de T ou Y;
- Previsão de contorno de sedimentos e transmissão através das estruturas;
- Previsão de difracção em estruturas marítimas;
- Simulações com escalas geográficas e temporais de dimensões consideráveis;
- Permite a introdução arbitrária de alturas, períodos e direcções de ondas;
- Introdução de múltiplos comboios de séries de ondas, de origem independentes;
- Transmissão de ondas através de quebramares destacados.

#### 4.3.1.4. **EXEMPLO DE APLICAÇÃO**

O GENESIS é um modelo que conta com uma vasta aplicação em inúmeros casos de estudo, Hanson, 1987, realizou três estudos onde efectua simulações com este modelo e Teixeira, 2006, também fez uso deste modelo ao prever a evolução do trecho de costa adjacente ao molhe Sul do porto da foz do rio Mondego, variando o comprimento do molhe Norte do mesmo porto e o volume de sedimentos que era transportado para Sul. A título de exemplo e de aplicação prática daquilo que já foi exposto neste capítulo, é aqui apresentado um caso estudo elaborado por *Gravens, M.B.*, em

1990 (*Bolsa Bay, California, Proposed Ocean Entrance System Study; Report 2, Comprehensive Shoreline Response Computer Simulation*) escrito no Coastal Engineering Manual (U.S. Army Corps of Engineers, 2006), relativo à costa Oeste dos Estados Unidos da América, mais especificamente em Bolsa Chica, Califórnia.

Este projecto tinha como principal objectivo verificar o impacto que uma proposta de abertura na baía de Bolsa Chica teria nas costas adjacentes. A Figura 4.8 representa uma vista geral do local de estudo bem como uma ampliação na baía de Bolsa Chica. O trecho a modelar tinha cerca de 16,1 km e estava compreendido entre a *Baía de Anaheim* e o *Rio de Santa Ana*.

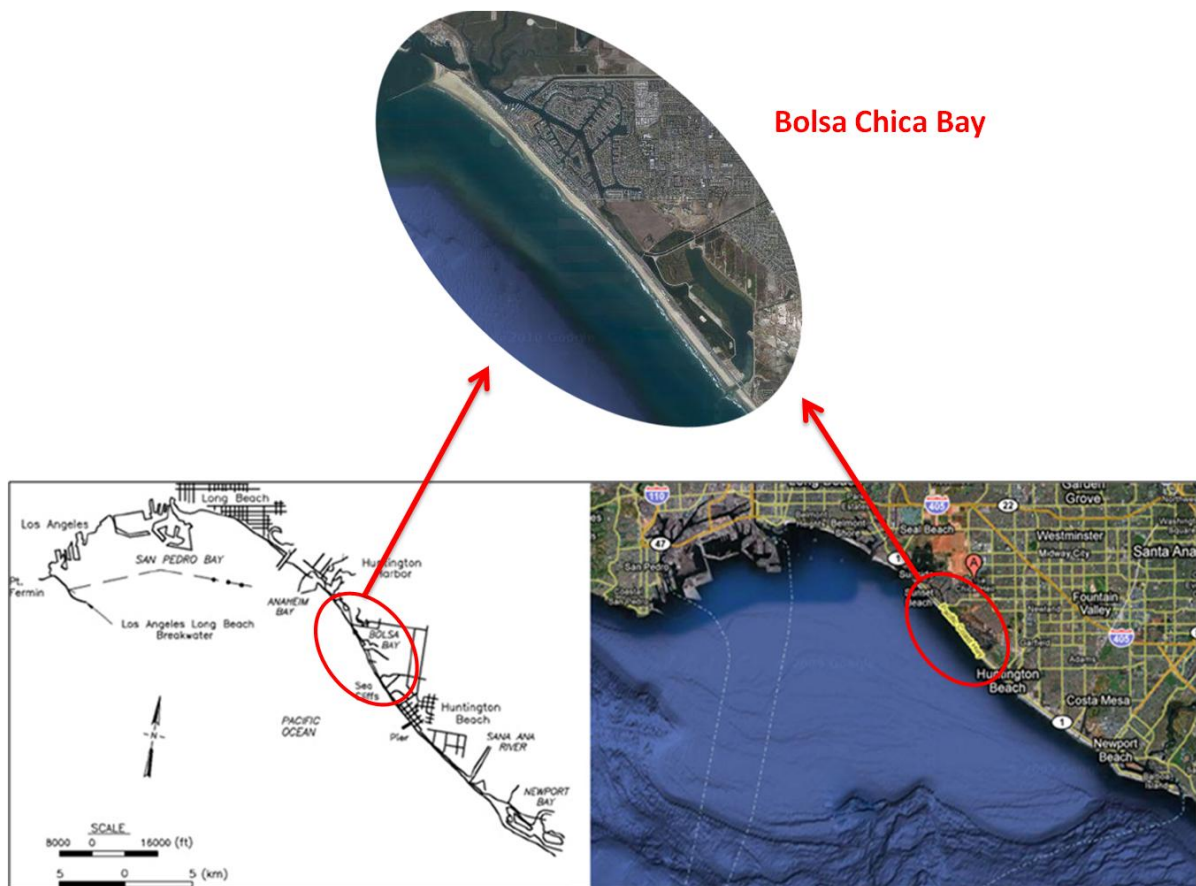


Figura 4.8 - Vista geral do caso de estudo de Bolsa Chica, adaptado de U.S. Army Corps of Engineers, 2006 e Google Maps

O caso de estudo incluía várias estruturas marítimas naturais e artificiais. Dois molhes, o molhe de *Anaheim* e o molhe a Norte da foz do rio de *Santa Ana*, as falésias de *Huntington Beach* e o molhe de *Huntington*.

Para simular e prever qualquer alteração no trecho em estudo, foram utilizados dados relativos à posição da linha de costa, de 1963 a 1983. As posições da linha de costa nestas datas foram utilizadas para calibração e verificação do modelo GENESIS. No final da calibração os coeficientes empíricos  $K_1$  e  $K_2$  utilizados na fórmula geral do GENESIS foram respectivamente 0,45 e 0,40.

Condições de fronteira oceânicas foram criadas, estabelecidas pelo modelo RCPWAVE (*Regional Coastal Processes Wave Model*), que tal como o modelo STWAVE, faz a propagação do clima de agitação do largo para a costa. A seguinte figura ilustra essas condições de fronteira, bem como os domínios de cálculo dos dois modelos GENESIS e RCPWAVE.

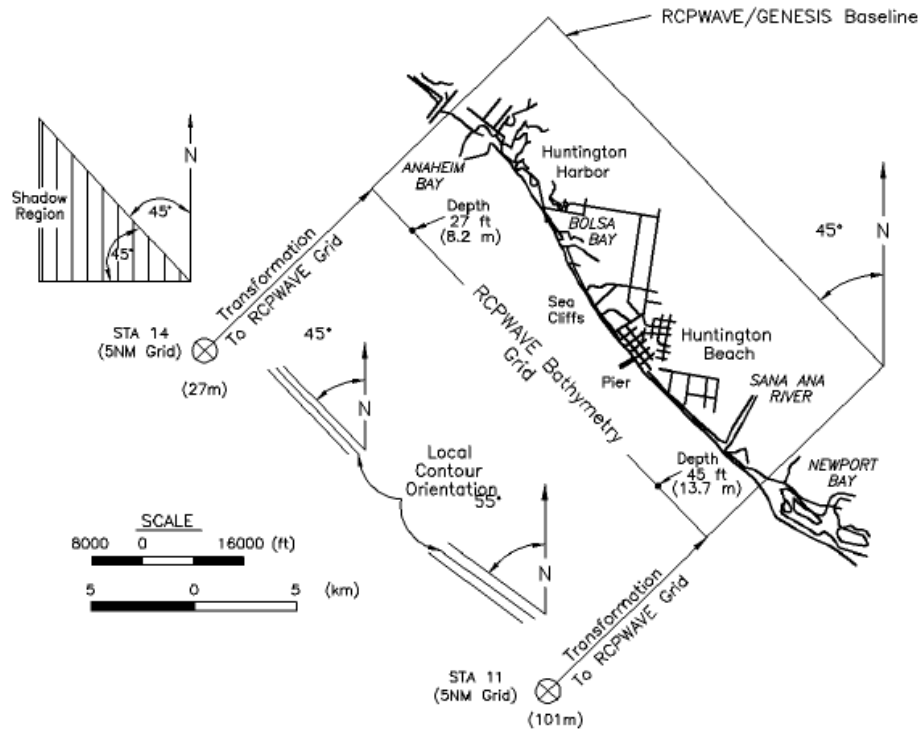


Figura 4.9 - Características do local de estudo Bolsa Chica (U.S. Army Corps of Engineers, 2006)

Após a implantação e calibração do modelo, foram testados 8 projectos diferentes para a entrada de navegação de *Bolsa Chica*. Estes oito cenários foram modelados para períodos de 5 e 10 anos usando dados aleatórios de clima de agitação. No Anexo D está ilustrado um desses 8 projectos.

No final do estudo foram tiradas conclusões alusivas ao facto de que qualquer alteração teria de ser acompanhada por alimentações artificiais de forma a minimizar impactos negativos na linha de costa, nomeadamente erosões excessivas a barlamar dos molhes. Concluiu-se ainda que o local onde se pretendia estabelecer a abertura de Bolsa Chica, está localizado numa região de convergência de transporte longitudinal de sedimentos e que um afastamento da entrada para a baía, em qualquer uma das direcções longitudinais, não traria grandes alterações à posição da linha de costa simulada.

O tipo de aplicação do modelo GENESIS que foi implementada em *Bolsa Chica* na costa Oeste dos Estados Unidos da América é das mais comuns no mundo da engenharia costeira e onde o modelo acaba por ter maior utilidade.

### 4.3.2. POSIÇÃO DA LINHA DE COSTA

No caso em estudo entende-se como situação de referência a linha de costa desenhada ao longo do domínio de estudo. Por definição a linha de costa corresponde à intersecção do plano do nível médio do mar com o perfil da praia, ou seja, corresponde à linha formada pelo zero topográfico (ZT). Segundo dados do Instituto Hidrográfico e Teixeira, 2006, no trecho de costa em estudo esta posição está definida sensivelmente a uma cota de +2.0 ZH.

A posição da linha de costa de referência, linha de costa inicial a ser utilizada no modelo matemático GENESIS, foi definida conjugando as informações disponíveis tanto nos elementos topográficos do Instituto da Água como através dos elementos hidrográficos do Instituto Hidrográfico.

Admitindo que o perfil da praia apresenta um declive constante, foi traçada uma linha paralela à curva de nível +2.0 ZT. A forma como foi traçada esta linha está descrita de forma sucinta no subcapítulo 3.4. Na prática a linha traçada corresponde ao zero topográfico, que por sua vez corresponde à cota +2 segundo o zero hidrográfico.

### 4.3.3. PARÂMETROS DE CONTROLO

O modelo matemático GENESIS requer a entrada de dados específicos do domínio de estudo. Entre estes estão elementos relacionados com as características da praia e sedimentos, bem como as condições de fronteira do modelo.

#### 4.3.3.1. PROFUNDIDADE DE FECHO E COTA DE BERMA

Entende-se como profundidade de fecho, *closure depth*, a profundidade a partir da qual o perfil da praia não sofre modificações significativas. É na zona delimitada entre a profundidade de fecho e a intersecção do nível médio das águas do mar com a praia (linha de costa), isto é, entre a praia emersa e a praia submersa, que ocorrem as maiores transferências sedimentares, resultantes das correntes longitudinais e transversais registadas. Para profundidades maiores que a profundidade de fecho o transporte sedimentar pode ser considerado como desprezável.

Na literatura esta grandeza é designada tanto como profundidade de fecho, profundidade crítica, limite, do perfil activo, ou de movimentação sedimentar e está representada por  $h_c$  ou  $d_c$ .

Segundo U.S. Army Corps of Engineers (Part IV Chapter 3), 2006, *Hallermeier* em 1978, desenvolveu uma solução analítica através de ensaios laboratoriais e dados de campo para a profundidade de fecho medida anualmente:

$$h_c = 2,28H_S - 68,5 \left( \frac{H_S^2}{gT_{H_S}^2} \right) \quad (11.5)$$

Onde,

- $h_c$  - cota de berma anual;
- $H_S$  - altura de onda significativa que é excedida em 12 horas por ano;
- $T_{H_S}$  - período associado à altura de onda significativa;
- $g$  - aceleração da gravidade.

Esta solução é principalmente dependente da altura de onda, primeiro termo, e o segundo termo da equação proporciona um ajuste para a declividade de onda.

Outra solução analítica elaborada para estimar a profundidade de fecho foi proposta por *Birkemeier* em 1985 no estudo, *Field Data on Seaward Limit of Profile Change*. Segundo Kraus, 1998, *Birkemeier* modificou a equação de *Hallermeier* com base num estudo realizado em *Duck, North Carolina*, e chegou à seguinte expressão para a profundidade de fecho:

$$h_c = 1,75H_S - 57,9 \left( \frac{H_S^2}{gT_{H_S}^2} \right) \quad (11.6)$$

A equação de *Birkemeier* produz valores para a profundidade de fecho menores que a equação de *Hallermeier*, fruto de coeficientes mais baixos que afectam tanto a altura de onda como a declividade de onda.

Para a definição de  $h_c$ , o modelo GENESIS, utiliza uma relação muito simples:

$$h_c = 2H_{mas} \quad (11.7)$$

Assim a profundidade de fecho do modelo é apenas estimada por  $H_{mas}$ , que não é mais do que a altura de onda significativa máxima anual, no local em estudo (Hanson, 1987).

Nas simulações realizadas através do modelo GENESIS, o parâmetro de profundidade de fecho é especificado pelo utilizador, tendo de ser calculado pelo mesmo a priori. Os valores produzidos pela expressão de *Hallermeier* são mais conservadores e por conseguinte os mais recomendáveis para uma primeira aproximação de cálculo.



Para valores de  $H_s$  e  $T$  foram usados os correspondentes à onda 6, 6,5m e 15s respectivamente, devolvendo os seguintes resultados para a profundidade de fecho segundo as fórmulas apresentadas.

Quadro 4.1 - Profundidades de fecho

Hallermeier	Birkemeier	GENESIS
13,5 m	10,3 m	12,5 m

Como seria de esperar a fórmula de *Hallermeier* produziu um valor mais elevado para a profundidade de fecho, muito por culpa dos coeficientes multiplicativos que afectam as grandezas na fórmula.

Para a profundidade de fecho a ser utilizada nas simulações com o modelo GENESIS, foi assumido o valor de  $h_c = 12m$ , referido ao nível médio do mar. Este valor corresponde a uma aproximação da média aritmética dos resultados do Quadro 4.1.

Para a cota de berma da praia foi estipulado o valor de  $h_c = 4 m$ , referido ao nível médio das águas do mar. Este valor foi determinado através da consulta do levantamento disponibilizado pelo INAG e confirmado no estudo realizado por Teixeira, 2006.

#### 4.3.3.2. DIMENSÃO MÉDIA DOS SEDIMENTOS

A caracterização e avaliação dos sedimentos transportados, é uma análise fundamental num estudo que pretende compreender o transporte longitudinal e a sua conseqüente deriva litoral. O modelo GENESIS utiliza como dado de entrada o diâmetro característico, muitas vezes tido em conta como diâmetro médio,  $D_{50}$  expresso em milímetros.

Para a caracterização da dimensão média dos sedimentos na zona de estudo, foi utilizada a informação disponibilizada pelo Sistema Nacional de Informação dos Recursos do Litoral, *SNIRL* (<http://geo.snirh.pt/>). Aqui a dimensão do sedimento emerso desde a Foz do rio Mondego até à Praia Velha de São Pedro de Muel, está classificada como areia grosseira a média.

Segundo a escala granulométrica de *Wentworth* os limites inferior e superior, para as classes de sedimentos assinaladas, são os representados no quadro seguinte.

Quadro 4.2 - Escala granulométrica de *Wentworth* para areias grosseiras e médias

	Limite mínimo (mm)	Limite máximo (mm)
<b>Areia grosseira</b>	0,25	2,00
<b>Areia média</b>	0,13	0,25

O diâmetro médio adoptado corresponde à média aritmética das classes e da média dos valores alcançados na média de cada classe,  $D_{50} = 0,660 \text{ mm}$ .

#### 4.3.3.3. CONDIÇÕES DE FRONTEIRA

As condições de fronteira são, no fundo, parâmetros de controlo que permitem especificar a forma como o trecho de estudo interage com as zonas adjacentes.

Na prática, no estudo em questão, existem condições de fronteira laterais, a Norte e a Sul do trecho de estudo, e uma fronteira do lado do mar, especificada pelo modelo GENESIS, que irá receber a informação do clima de agitação propagado de condições ao largo.

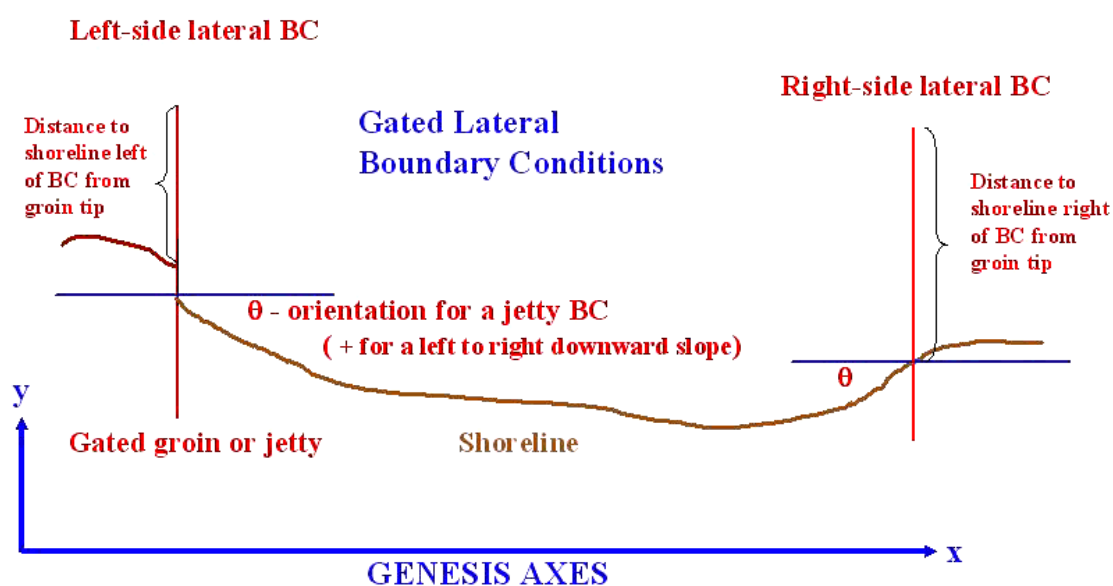


Figura 4.10 – Representação das fronteiras do modelo GENESIS, adaptado de CEDAS

Na Figura 4.10 está representada a forma como o software CEDAS, especifica as condições de fronteira laterais. A Norte e a Sul as condições de fronteira são impostas pelas construções marítimas presentes. A Norte, a condição de fronteira corresponde ao molhe sul do porto da Figueira da Foz, esporão 7, e a Sul, corresponde ao esporão situado na povoação de Costa de Lavos, esporão 1. A condição de fronteira marítima, *seaward boundary*, é imposta pelo modelo matemático GENESIS.

Tanto a Norte como a Sul as condições de fronteiras foram especificadas no modelo como sendo do tipo, *gated groin*, tal definição implica que a passagem de sedimentos está condicionada por uma comporta fictícia que controla a passagem de sedimentos em torno da extremidade dos esporões, e, que os mesmos são impermeáveis à passagem de sedimentos ao longo do seu comprimento.

O controlo desta passagem de sedimentos é especificado no software pela distância da extremidade do esporão à linha de costa definida para lá das condições de fronteira. A Sul, essa distância

corresponde ao comprimento do esporão da Costa de Lavos, e a Norte a um valor que ultrapassa o comprimento do esporão 7 (1000m). Esta programação das condições de fronteira laterais permite a saída de sedimentos nos dois esporões, mas só a Sul é permitida a entrada de sedimentos.

#### 4.3.4. CALIBRAÇÃO DO MODELO GENESIS

A calibração do modelo GENESIS é, preferencialmente, feita através de uma linha de costa de referência, conhecida, tomada como resultado óptimo e representativo após a simulação de calibração.

A falta de dados sinópticos de posições da linha de costa em datas conhecidas tornou a calibração do modelo difícil.

O parâmetro de controlo utilizado para a calibração do modelo foi o caudal de transporte resultante verificado na zona, e estimado por Barata, et al., 1996 (Quadro 3.2). Assim pretendia-se que as simulações de calibração apresentassem, ao longo do trecho, um caudal de transporte de sedimentos longitudinal da ordem de  $1,3 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{ano}$ , dirigido para Sul.

##### 4.3.4.1. PARÂMETROS DE CALIBRAÇÃO

Para atingir o caudal de transporte pretendido foi necessário efectuar ajustes nos seguintes parâmetros de calibração do modelo.

- Condições de *bypass* no molhe Norte (esporão sul da embocadura do rio Mondego);
- $K_1$  e  $K_2$ ;
- Ângulo de controlo, *Angle offset*.

As condições de *bypass*, que permitiram simular o caudal longitudinal de sedimentos, foram assumidas como uniformes. Aqui o software permite a variação do período, localização e taxa total de *bypass* ( $\text{m}^3/\text{h}$ ):

As constantes  $K_1$  e  $K_2$ , entendidas como parâmetros de calibração, controlam a magnitude da taxa do caudal de transporte longitudinal e a escala temporal da simulação. O parâmetro *angle offset*, consiste numa ferramenta que permite efectuar uma translação do ângulo de incidência de onda, fazendo “rodar” o clima de agitação, de forma a produzir resultados mais coerentes.

Estes três parâmetros foram calibrados com o objectivo de produzir o caudal constante de  $1,3 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{ano}$ , dirigido para Sul, que Barata, et al., 1996, alcançaram no seu estudo. O quadro

seguinte representa os valores finais da calibração destes parâmetros e no Anexo E está representado o gráfico que traduz o caudal anual ao longo do trecho, produto final da calibração.

Quadro 4.3 - Resultados da calibração do modelo GENESIS

<b>bypass</b>	Período: duração da simulação
	Localização: intervalo de 300 m contados a partir do esporão 7 e dirigidos para Sul
	Taxa total de bypass: 148,4 m <sup>3</sup> /h, correspondente a 1,3 × 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /ano
<b>K<sub>1</sub></b>	0,13
<b>K<sub>2</sub></b>	0,10
<b>angle offset</b>	-9,5°

## 5. RESULTADOS

Neste capítulo estão expostos os resultados obtidos após a simulação das diferentes séries de dados, características dos diferentes cenários considerados.

Os resultados dos modelos matemáticos serão aqui discutidos separadamente, não obstante a ligação existente entre os resultados produzidos pelos modelos, onde os resultados do modelo STWAVE são valores de entrada para o modelo GENESIS.

### 5.1. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS DO MODELO STWAVE

O modelo STWAVE teve como objectivo a propagação do clima de agitação de condições ao largo para estações de registo de dados estacionadas na profundidade de fecho. Neste caso, o clima de agitação era composto por um conjunto de ondas monocromáticas, ou seja, o modelo apenas irá afectar a altura e o ângulo de incidência da onda.

Embora não influenciem directamente a parametrização do clima de agitação, uma vez que a propagação das ondas é feita individualmente, os resultados da propagação das diferentes ondas são aqui apresentados, pois é um passo intermédio importante e aquele que fornece a informação do estado de agitação ao modelo GENESIS.

O módulo NEMOS do software CEDAS produz para além de ficheiros de dados complexos, ficheiros do tipo imagem onde é possível ter uma noção global da propagação. Esse conjunto de resultados encontra-se no Anexo F. Neste conjunto de imagens está espelhada a evolução da altura de onda de cada onda característica, representada por um gradiente colorido das “curvas de nível” de altura de onda, e a evolução da direcção das ondas representada por vectores. A análise geral desse conjunto de imagens mostra uma clara diminuição da altura de onda do largo para a costa e uma reorientação das ondas para direcções perpendiculares à costa. À medida que a onda se vai aproximando da costa e toma cada vez mais direcções perpendiculares a esta, denota-se um ligeiro aumento da altura de onda, estando este facto directamente relacionado com fenómenos de empolamento acompanhados pela influência do fundo.

Os resultados aqui apresentados estão classificados por onda, segundo a ordem apresentada no Quadro 3.1. De seguida é feita a exposição e análise dos resultados obtidos nas estações de registo de dados na profundidade de fecho, 12m.

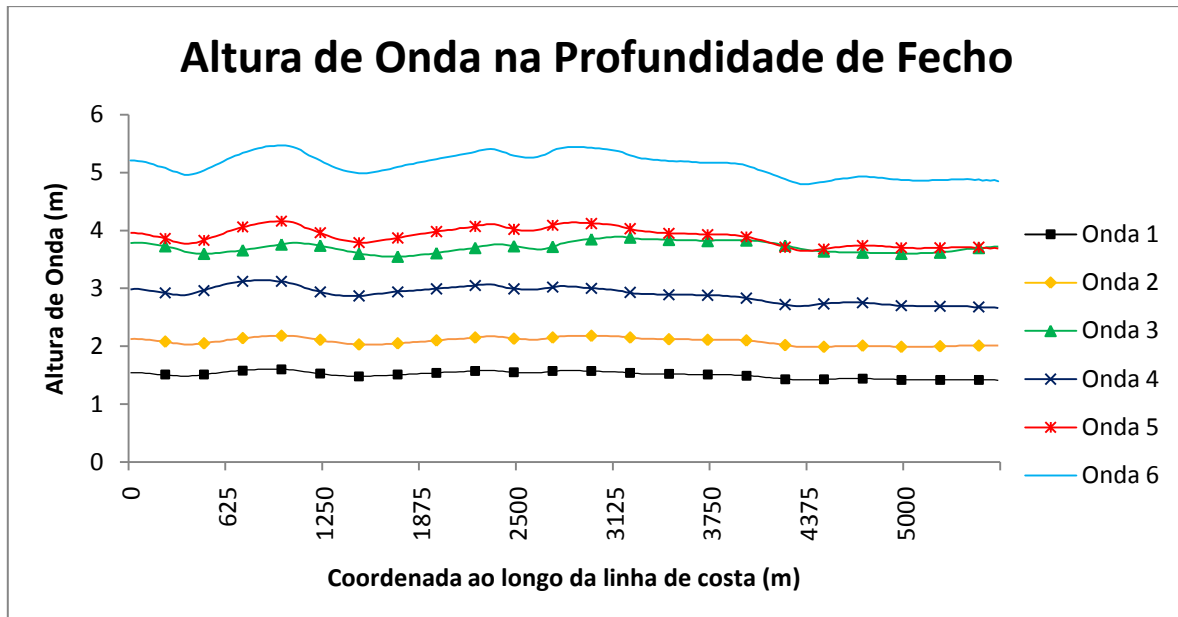


Figura 5.1 – Gráfico representativo da altura de onda na profundidade de fecho

Na Figura 5.1 estão representadas as alturas de ondas das diferentes ondas de referência ao longo da costa à profundidade de 12m. A partir do gráfico é possível analisar que cada onda apresenta uma altura relativamente constante ao longo do trecho de costa, estando essa regularidade também presente quando comparadas entre si.

A mesma conclusão pode ser tirada para as direcções de onda, da análise da Figura 5.2., onde estão representadas as direcções das diferentes ondas representativas. A direcção de onda acaba por variar no intervalo de 275° a 300°.

O gráfico da Figura 5.3 apresenta uma análise comparativa das características iniciais das ondas ao largo com as características das mesmas ondas após propagação. As barras azuis correspondem aos valores da altura de onda ao largo que foram introduzidos na fronteira oceânica do modelo, as barras vermelhas correspondem ao valor médio de altura de onda registado ao longo da costa na profundidade de fecho e as barras a verde representam a diferença entre as barras a azul e vermelho. A análise deste gráfico vem confirmar o decréscimo de altura de onda verificado na profundidade de fecho, pós propagação de onda.

De forma análoga foi construído o gráfico da Figura 5.4; neste gráfico é representada a evolução das direcções de cada onda. Como se pode verificar as ondas que, ao largo apresentavam maiores ângulos de incidência foram aquelas que sofreram maior variação. Não obstante, de um modo geral todas as ondas tendem para direcções normais à linha de costa após a sua propagação.

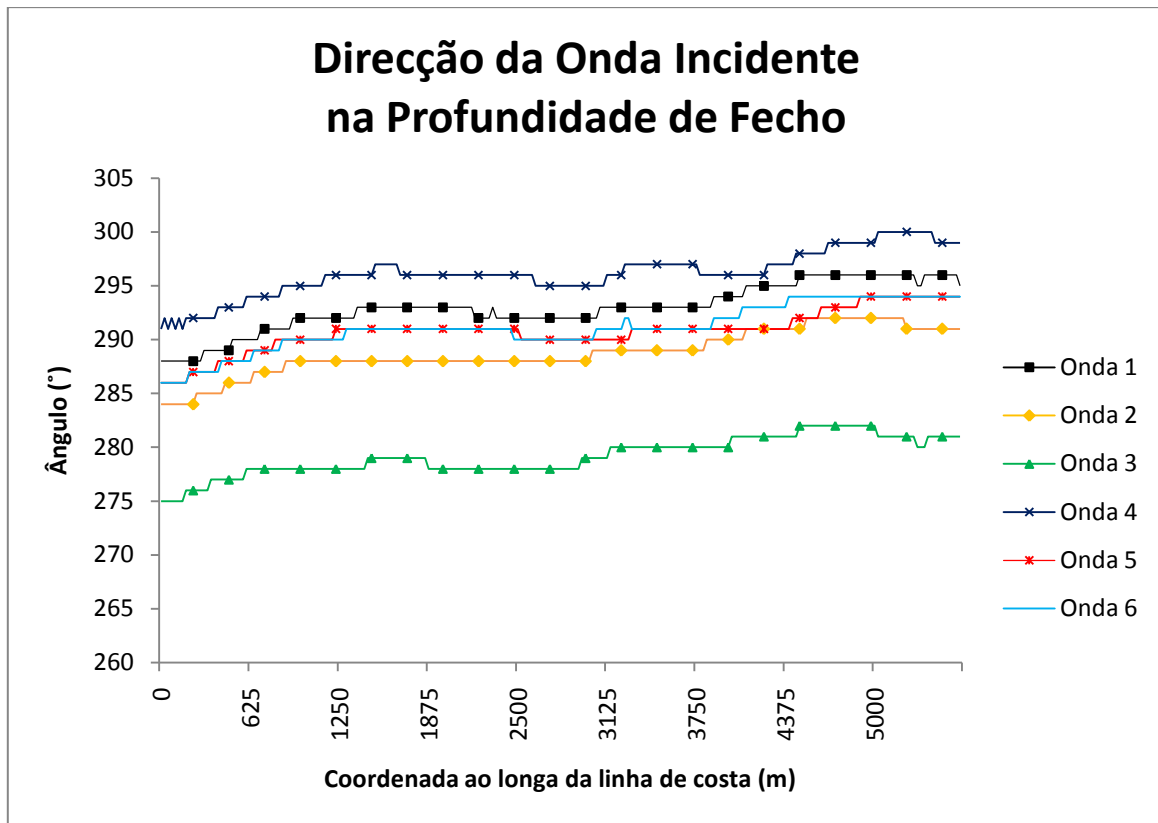


Figura 5.2 – Gráfico representativo da direcção de onda na profundidade de fecho

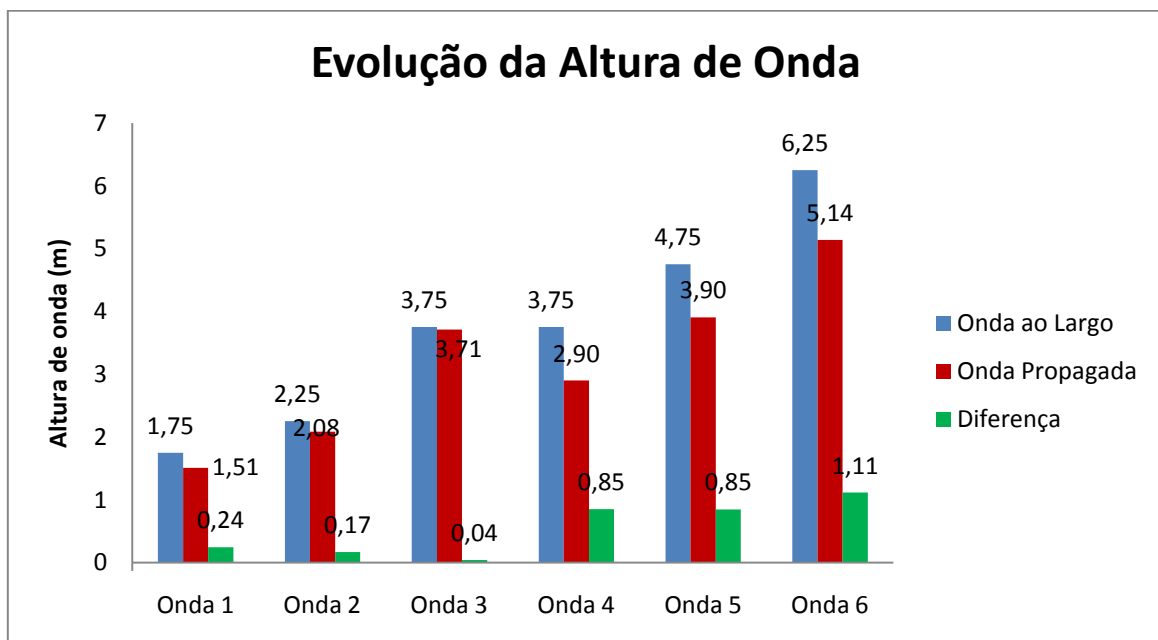


Figura 5.3 – Evolução da altura de onda do largo para a costa

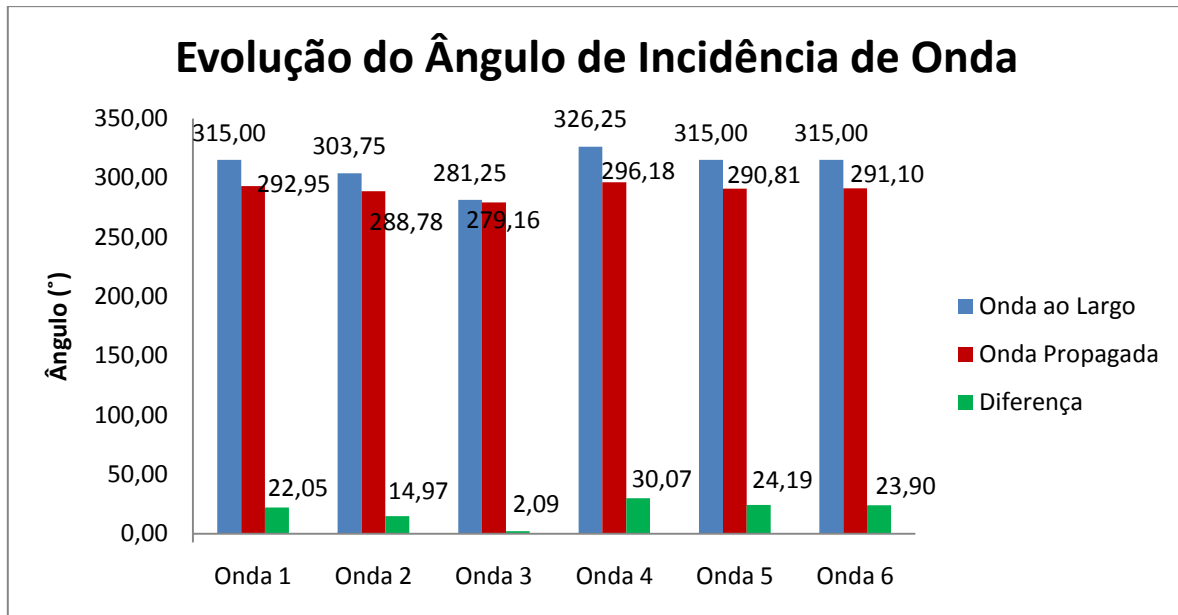


Figura 5.4 - Evolução da direcção de onda do largo para a costa

Da análise conjunta dos dois últimos gráficos verifica-se que a onda 3 é aquela que sofre menores alterações, tanto ao nível da altura de onda como de direcção. Este facto deve-se em muito à direcção inicial da onda ser quase perpendicular à costa. A onda 4 acaba por sofrer a maior variação, tanto de altura de onda como de direcção.

## 5.2. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS DO MODELO GENESIS

De seguida são discutidos os resultados do modelo GENESIS. A análise destes resultados é feita individualmente, cenário a cenário, optando-se por confrontar os resultados dos diferentes cenários após o último período de simulação.

Para uma melhor representação dos resultados obtidos optou-se por não utilizar o “output” do módulo NEMOS, incluído no Anexo G, mas sim realizar o tratamento dos resultados via *Microsoft Excel*, possibilitando uma correlação dos resultados obtidos para cada período de simulação e uma análise comparativa de cada cenário.

Resumindo, o assunto já tratado no subcapítulo 3.3, foram criados 7 cenários de cálculo. No Cenário A o clima de agitação é ordenado por ordem crescente de altura de onda, já o Cenário B está organizado na ordem inversa. O Cenário C está organizado por ordem crescente de ângulo de incidência de onda e o Cenário D pela ordem inversa. Nos cenários E, F e G o clima de agitação é disposto aleatoriamente durante um ano de registos.



### 5.2.1. ANÁLISE INDIVIDUAL DOS CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO

O grupo de gráficos expostos no Anexo H reproduz os resultados obtidos nas simulações realizadas com modelo GENESIS para os diferentes cenários de cálculo. Neste estão representadas as diferentes linhas de costa ao cabo dos respectivos períodos de simulação, tendo como referência a linha de costa inicial. Através deste tipo de diagramas é possível analisar a evolução da linha de costa ao longo do tempo e analisar os resultados obtidos para cada cenário.

A análise gráfica evidencia uma evolução da linha de costa para uma posição de equilíbrio. De facto, à medida que o período de simulação aumenta as diferenças entre as diferentes linhas de costa diminuem. Para períodos de simulação entre os 12 e 20 anos são poucas as alterações registadas na linha de costa, chegando a coincidir em alguns pontos. Esta tendência acaba por ser válida para qualquer cenário simulado, variando apenas a posição relativa das linhas de costa de cenário para cenário e consequentemente o volume de sedimentos transportado.

### 5.2.2. ANÁLISE DOS CENÁRIOS SIMULADOS

Os resultados aqui apresentados necessitam de ser analisados tendo em conta as condições de fronteira e *bypass* estabelecidas aquando da calibração e controlo do modelo. A grande diferença que se verifica entre os resultados obtidos e a linha inicial, junto ao esporão 7, é justificada pelas condições de *bypass* implementadas nos primeiros 300m contados a partir desse esporão (entre os 5300 e os 5600m), sendo os resultados alcançados nesta zona menosprezados. É nesta zona que é forçado o caudal estudado por Barata, e al., 1996, de  $1,3 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{ano}$  e os resultados dependem em muito da forma como os sedimentos estiverem a ser depositados.

A análise que se segue compara os resultados dos cenários simulados ao fim de 20 anos. Os gráficos da Figura 5.5 e Figura 5.6 comparam os resultados obtidos para os cenários onde se utilizou uma serie temporal de eventos de agitação distribuídos por ordem crescente de altura de onda e outro por ordem decrescente, cenários A e B.

As diferenças entre os dois cenários, traduzem-se no facto do cenário A apresentar, no geral, comparativamente ao cenário B, maiores índices de sedimentação e erosão, situação que é mais evidente na vizinhança dos esporões 1, 2, 3 e 4. No gráfico da Figura 5.6 estão representadas essas mesmas diferenças, sendo que a maior se verifica na proximidade do esporão 2, de 19,81 m.

Relativamente à posição da linha de costa para os cenários C e D, onde se organizou a serie de ondas por ordem crescente e decrescente de direcção, gráficos da Figura 5.7 e Figura 5.8, as diferenças são modestas. No entanto, para o Cenário D, na proximidade do esporão 1 verifica-se um recuo da linha de costa em relação à linha inicial que chega a ultrapassar os 50m de diferença (Figura 5.8). Este recuo da linha deve-se em muito ao facto de no final de cada ano este cenário

apresentar uma direcção de onda propagada correspondente à onda 3, principal responsável pelo transporte de sedimentos na direcção positiva, Sul-Norte.

Quando comparados os cenários compostos por séries de onda organizadas de forma aleatória, cenários E, F e G, a linha de costa simulada adquire uma conformação quase idêntica em todos os cenários e o mesmo se pode afirmar quanto à sua posição relativamente à linha de costa inicial. A análise dos gráficos da Figura 5.9 e Figura 5.10 denota uma clara sobreposição das linhas correspondentes aos diferentes cenários, sofrendo apenas pequenas oscilações na vizinhança das construções marítimas.

Os gráficos da Figura 5.11 e Figura 5.12 comparam os cenários A, B, C, D e E. Os cenários F e G ficaram de fora desta análise pois ficou demonstrado que é passível de se assumir que o cenário E é representativo dos cenários F e G.

Da análise destes últimos gráficos verifica-se que no trecho compreendido entre o esporão 1 e 2, e com excepção feita ao Cenário D, todos os outros cenários apresentam acumulação de sedimentos. Em todos os cenários existe acumulação de sedimentos no campo de esporões de Cova-Gala (esporões 2, 3, 4, 5 e 6) e erosão mais a norte, entre o campo de esporões e o molhe sul da Figueira da Foz (esporão 7). Junto ao esporão 1 acaba por ser o cenário D que demonstra o maior recuo da linha de costa e o cenário B o maior avanço. Já perto do esporão 7 é no cenário A que se verifica o maior recuo da linha de costa simulada, continuando, contudo, a ser o cenário B aquele que produz o maior avanço da linha de costa.

Os gráficos da Figura 5.13 e Figura 5.14 correspondem a ampliações dos gráficos das Figura 5.11 e Figura 5.12, sobre a zona do campo de esporões de Cova-Gala. O avanço da linha de costa é generalizado, excepção feita na vizinhança do esporão 3 e ainda mais evidente junto ao esporão 6, onde a diferença entre os cenários e a linha de costa inicial acaba por ser negativa.

A interpretação destes dois últimos gráficos indica que o cenário E se pode classificar como uma média ponderada dos restantes, dado que a sua linha toma uma posição intermédia nesses gráficos. No Anexo I são comparadas as linhas correspondentes à média dos cenários A, B, C e D e a linha do cenário E. Globalmente, a sua leitura reforça a ideia de que o cenário E pode ser interpretado como uma posição intermédia dos restantes cenários, havendo poucas diferenças entre as duas linhas. No entanto é ao longo do campo de esporões de Cova-Gala que essas diferenças são menores, oscilando, as máximas, entre valores de 2 a 5m (Figura 5.15 e Figura 5.16).

### Linha de Costa t=20 anos

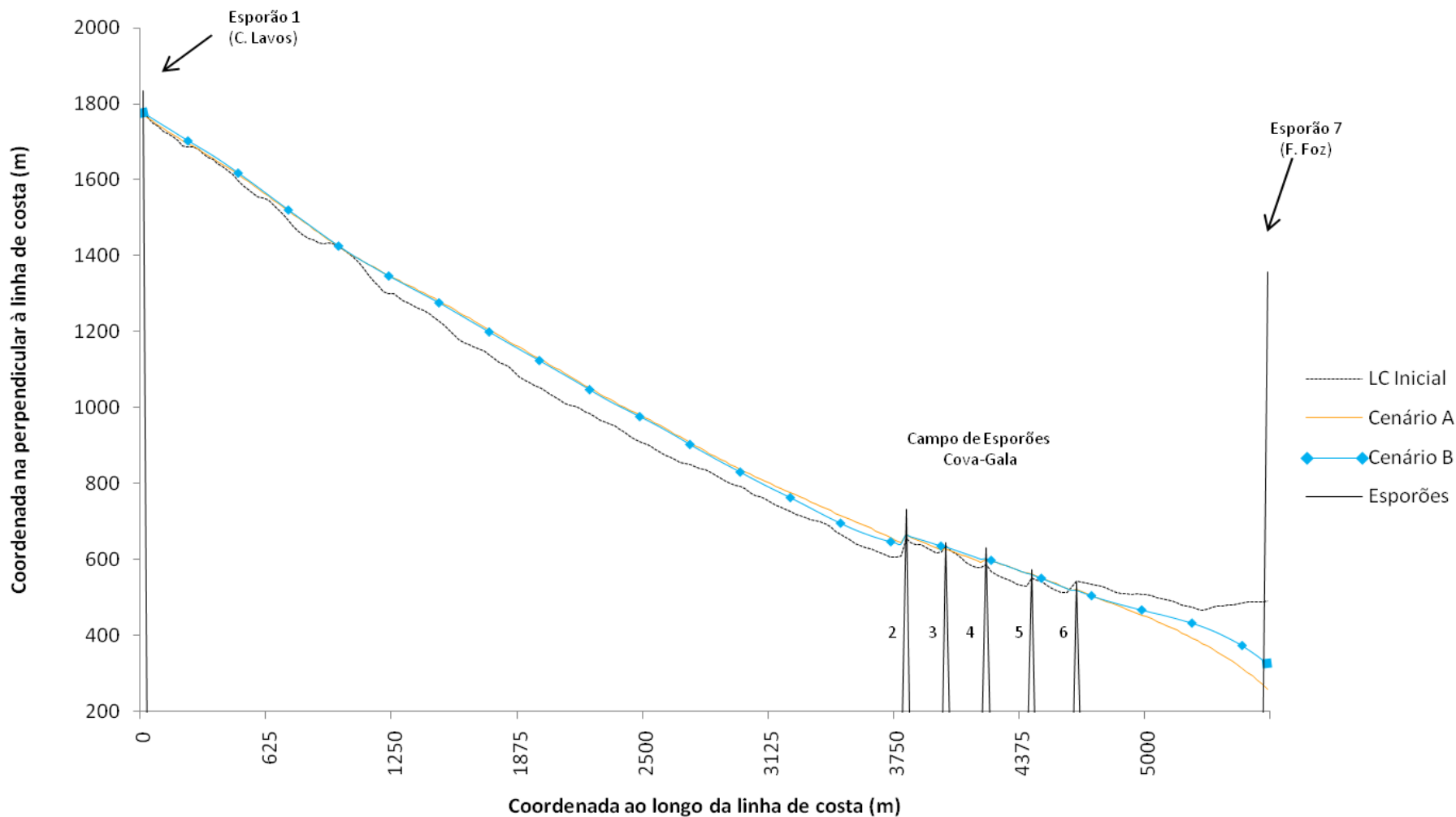


Figura 5.5 – Comparação da linha de costa simulada após 20 anos de simulação entre os cenários A e B e a linha de costa inicial

### Avanços e recuos da Linha de Costa t=20 anos (m)

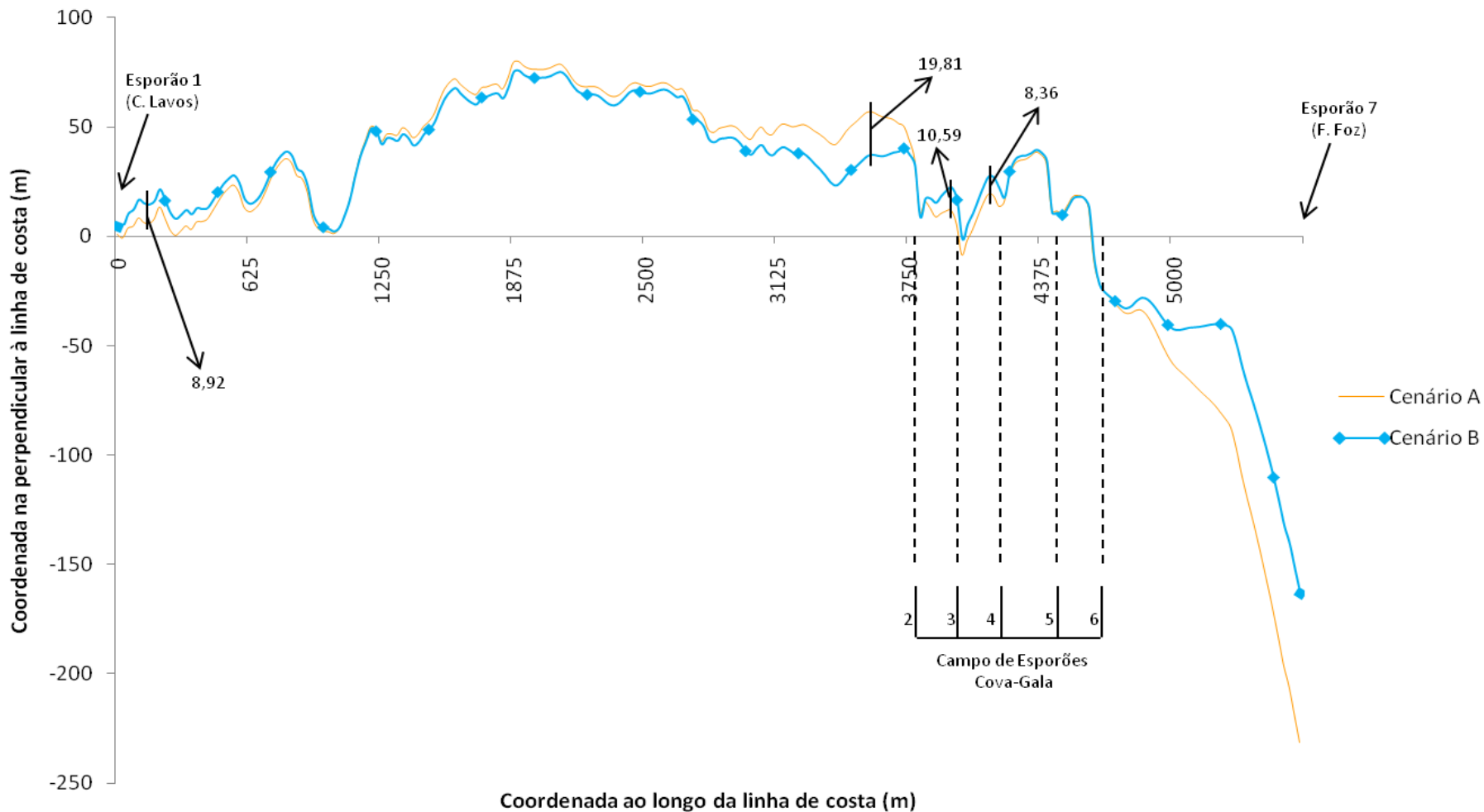


Figura 5.6 - Diferenças da linha de costa após 20 anos de simulação entre os cenários A e B

### Linha de Costa t=20 anos

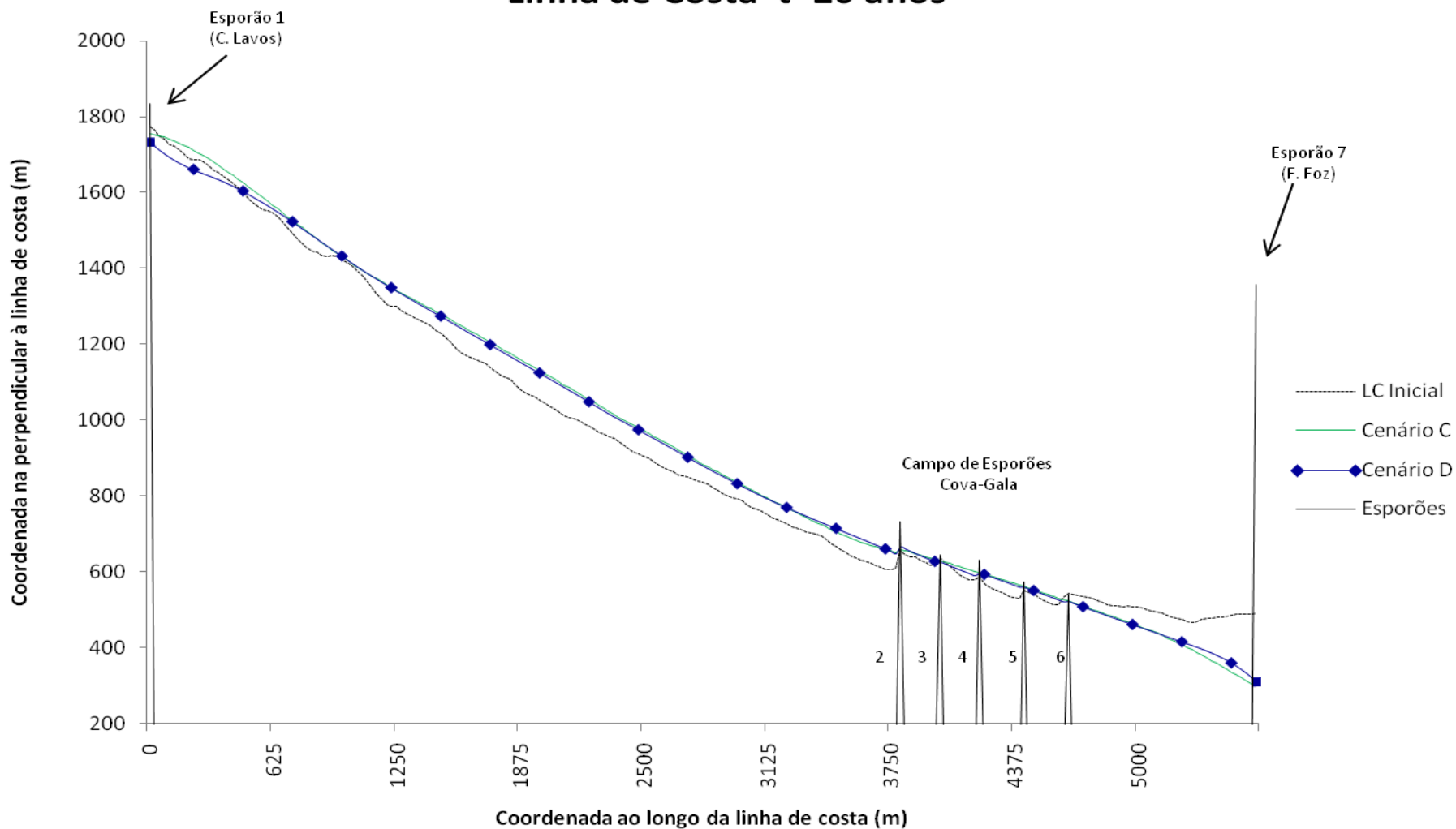


Figura 5.7 - Comparação da linha de costa simulada após 20 anos de simulação entre os cenários C e D e a linha de costa inicial



Figura 5.8 - Diferenças da linha de costa após 20 anos de simulação entre os cenários C e D

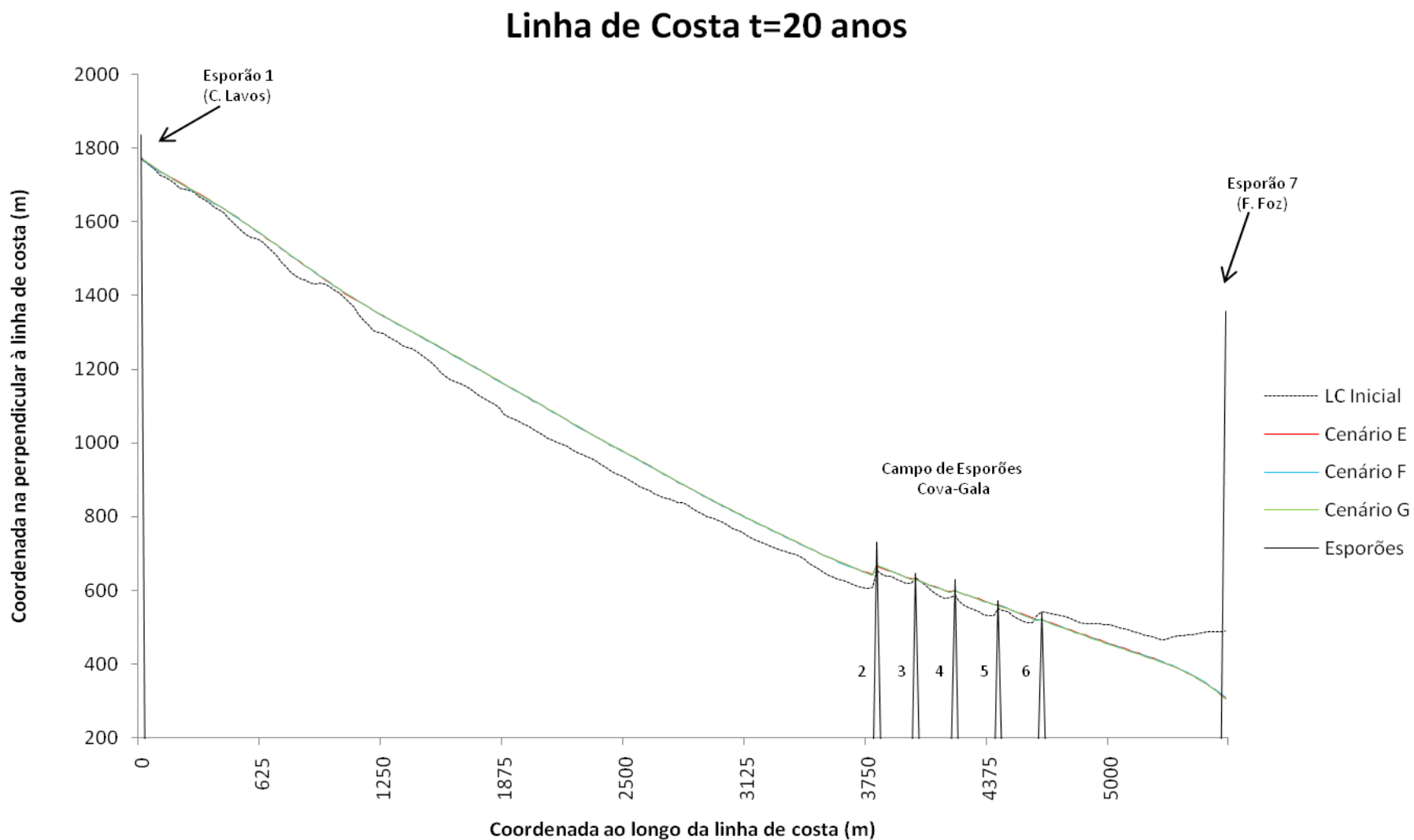


Figura 5.9 - Comparação da linha de costa simulada após 20 anos de simulação entre os cenários E, F e G, e a linha de costa inicial

### Avanços e recuos da Linha de Costa t=20 anos (m)

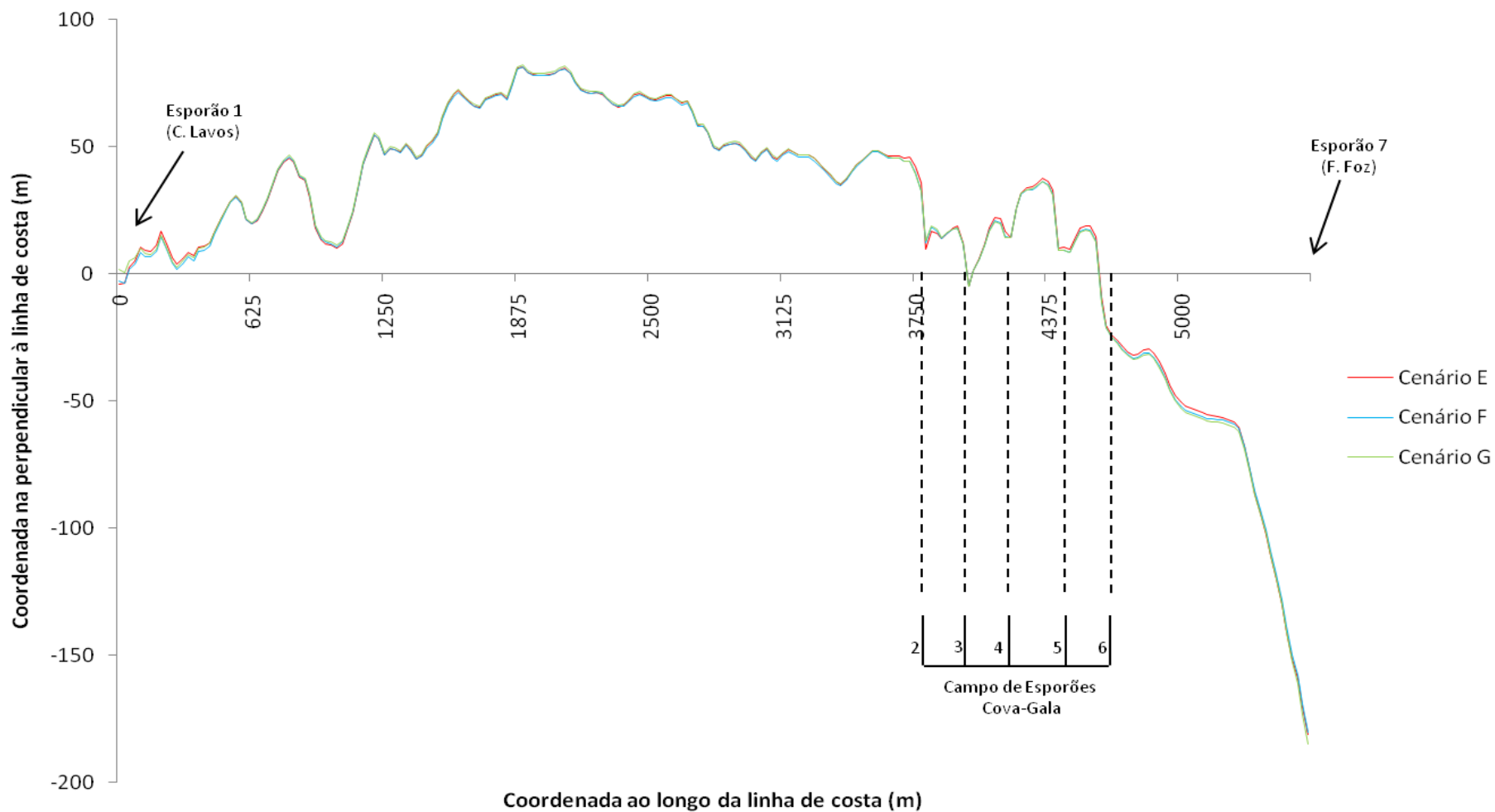


Figura 5.10 - Diferenças da linha de costa após 20 anos de simulação entre os cenários E, F e G



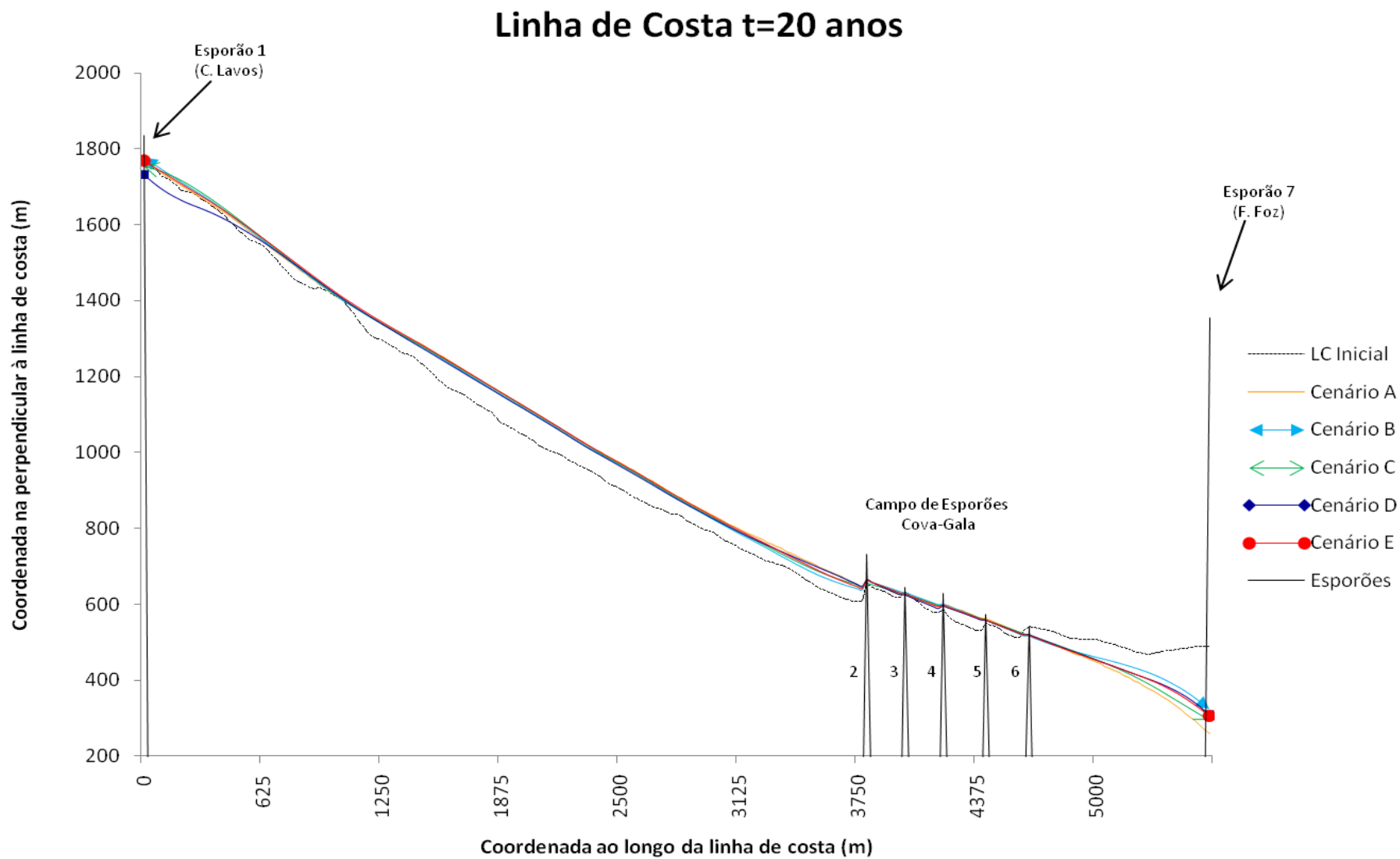


Figura 5.11 - Comparação da linha de costa simulada após 20 anos de simulação entre os cenários A, B, C, D, E, F e G e a linha de costa inicial

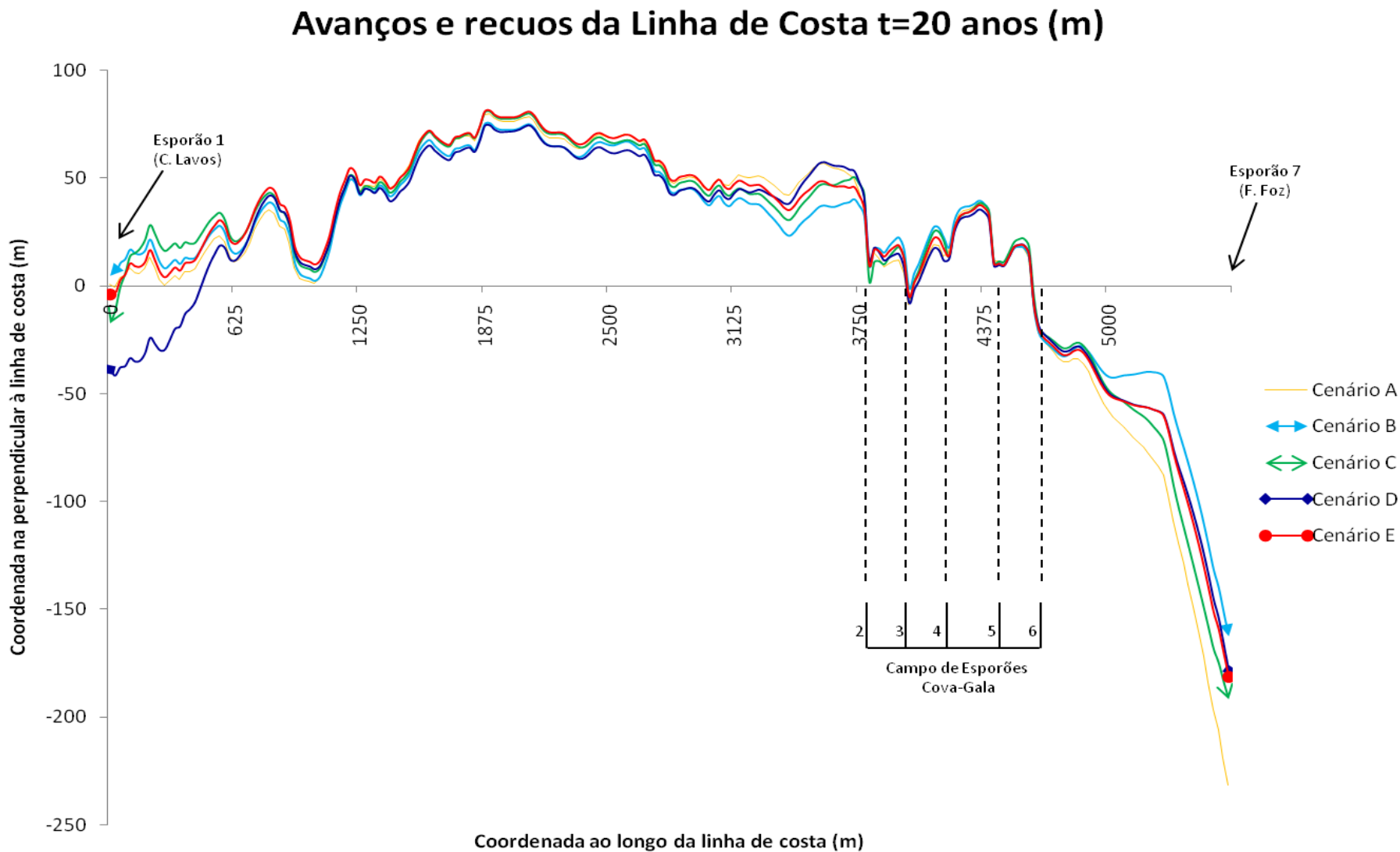


Figura 5.12 - Diferenças da linha de costa após 20 anos de simulação entre os cenários A, B, C, D, E, F e G

### Linha de Costa t=20 anos Campo de Esporões Cova-Gala

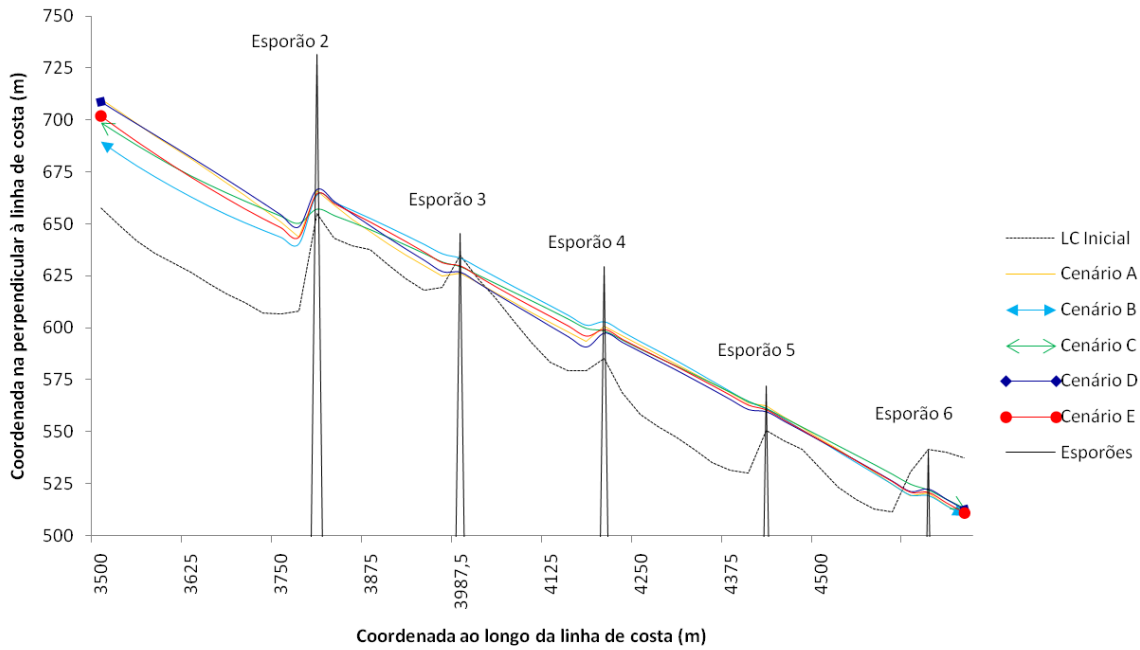


Figura 5.13 - Comparação da linha de costa simulada após 20 anos de simulação entre os cenários A, B, C, D, E, F e G, e a linha de costa inicial, na zona do campo de esporões Cova-Gala

### Avanços e recuos da Linha de Costa t=20 anos (m) Campo de Esporões Cova-Gala

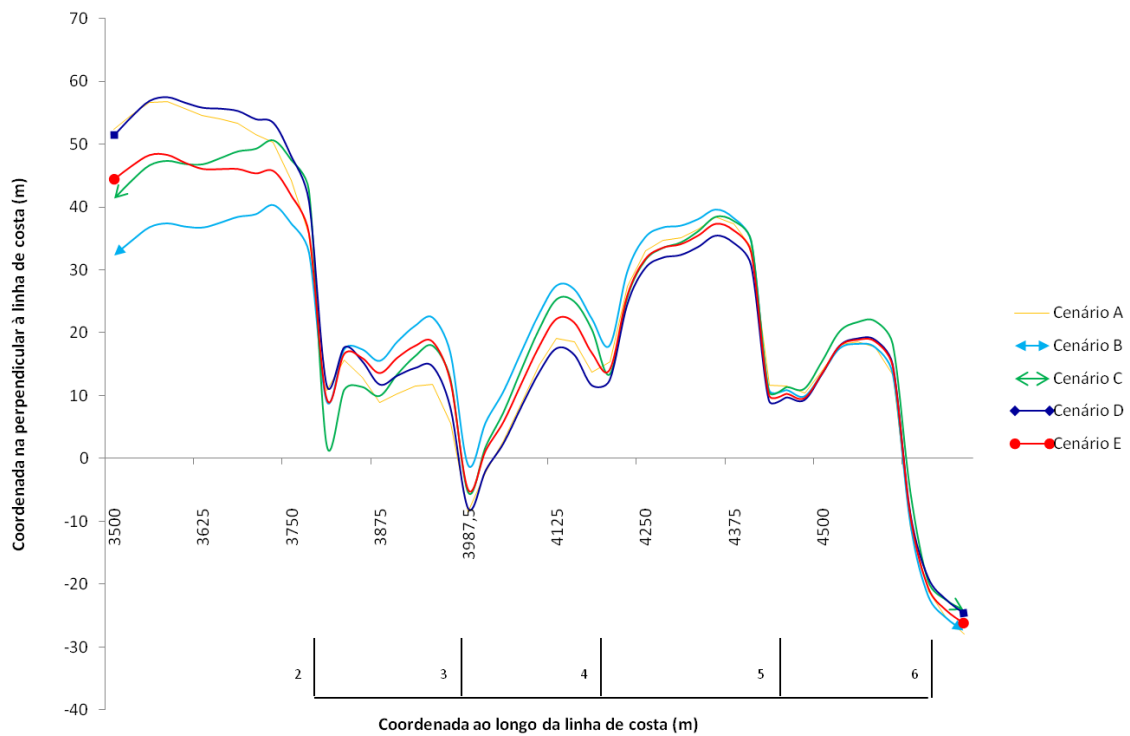


Figura 5.14 - Diferenças da linha de costa após 20 anos de simulação entre os cenários A, B, C, D, E, F e G, na zona do campo de esporões Cova-Gala



Figura 5.15 - Comparação da linha de costa simulada após 20 anos de simulação entre a média dos cenários A, B, C, D, o cenário E e a linha de costa inicial, na zona do campo de esporões Cova-Gala

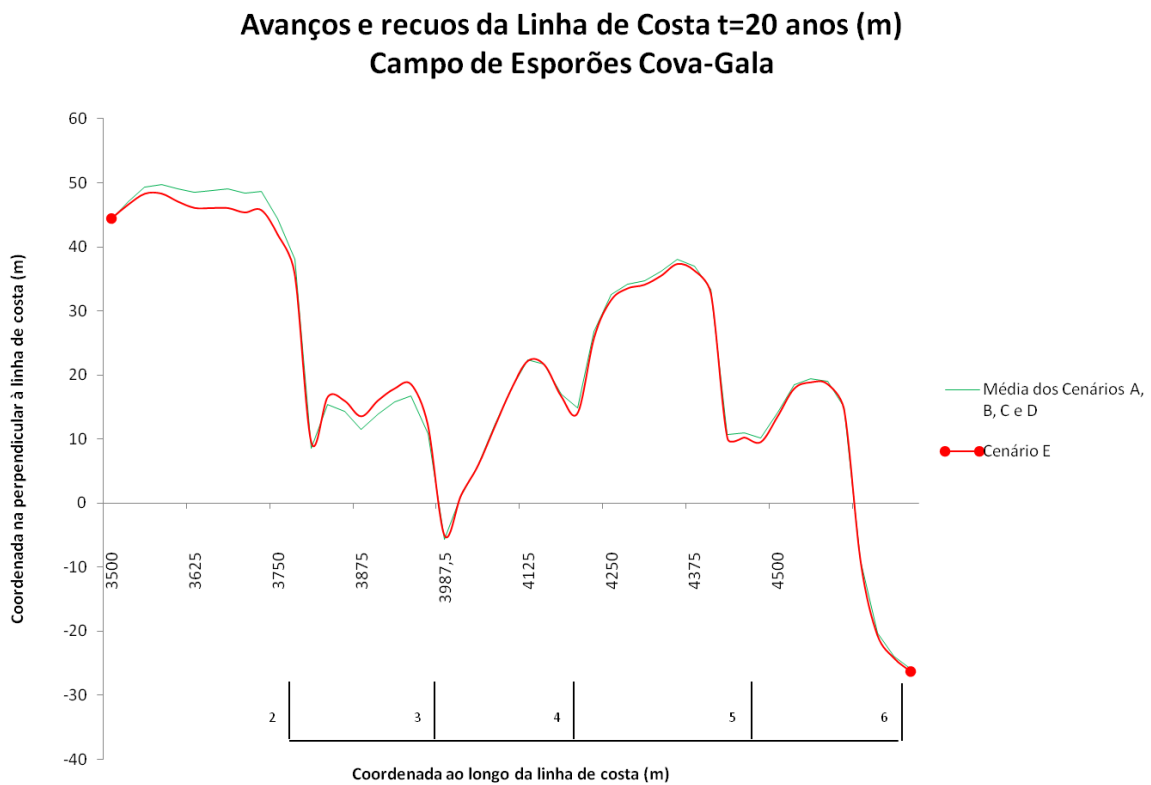


Figura 5.16 - Diferenças da linha de costa após 20 anos de simulação entre a média dos cenários A, B, C, D e o cenário E, na zona do campo de esporões Cova-Gala

O gráfico de barras da Figura 5.17, equivale ao volume de sedimentos movimentado correspondente à mudança da linha de costa durante 20 anos de simulação.

Analisando os valores do gráfico de barras da Figura 5.17, conclui-se que em todos os cenários se registou um saldo positivo de volume de sedimentos acumulado, ou seja, houve maior sedimentação do que erosão ao longo do trecho de estudo. Como seria espectável os cenários E, F e G apresentam valores relativamente próximos uns dos outros e superiores aos outros cenários estudados. O cenário D acaba por ser aquele que regista menores valores de volume de sedimentos depositados, muito por culpa da forte erosão registada perto do esporão 1. A interpretação destes resultados apenas é válida para as condições de controlo e de calibração impostas.

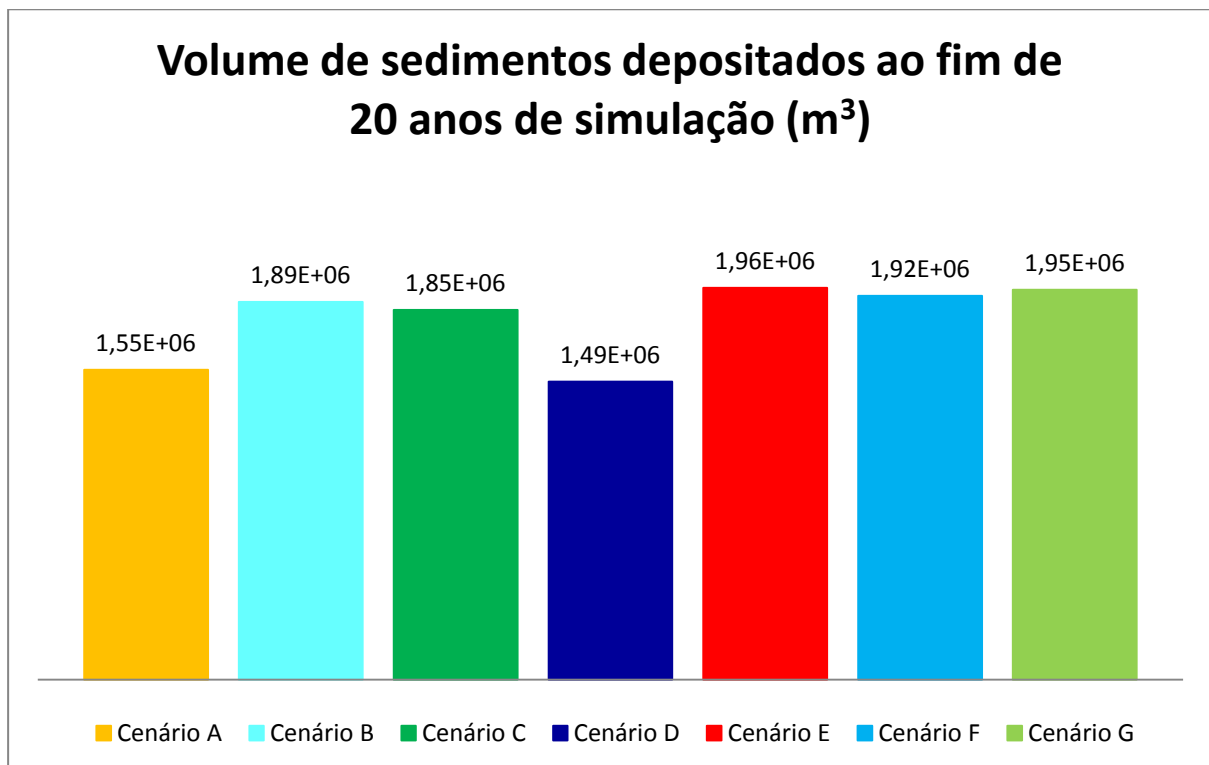


Figura 5.17 - Volume resultante de sedimentos correspondente à mudança da linha de costa no final de 20 anos de simulação, para os diferentes cenários



## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O principal objectivo desta dissertação é a de analisar a influência que as séries sintéticas de eventos de ondas e o tempo de simulação têm na evolução da linha de costa, usando modelos matemáticos de linha.

Nesta análise foi tida em conta a influência do período de simulação, e a forma como este afecta a evolução da linha de costa relativamente à posição inicial. Os períodos de simulação foram de 2, 4, 6, 12 e 20 anos para os diferentes cenários. Os resultados obtidos apontam para a tendência da linha de costa simulada encontrar uma posição de equilíbrio à medida que o período de simulação aumenta. Este período dependerá das condições de fronteira impostas ao modelo, de facto, quanto maior for a distância para as condições de fronteira, mais longo terá de ser o período de simulação para que se observe a nova posição de equilíbrio. Estes resultados permitem concluir que uma discretização adequada do tempo de simulação é importante e que no caso em estudo para períodos de simulação superiores a 12 anos se observam poucas alterações na linha de costa simulada.

Foi demonstrada dependência da evolução da linha de costa com as de séries sintéticas de onda não aleatórias. De facto os resultados obtidos, para os diferentes cenários, mostram uma evolução diferente da linha de costa. É seguro afirmar que as séries sintéticas de agitação marítima têm maior influência junto de esporões, quando estes estão suficientemente afastados uns dos outros, caso dos esporões 1, 2 e 7, pois foi na vizinhança destas construções que se verificaram maiores diferenças. Para longas extensões de faixa costeira onde não se faça sentir a interferência deste tipo de construções a influência de uma sequência de eventos de ondas incidentes tem menor importância.

A construção de séries aleatórias de eventos de onda incidente acaba por produzir resultados, que na sua própria escala, se podem considerar como idênticos. Esta afirmação é justificada pelas diferenças mínimas verificadas entre os cenários onde foram simuladas eventos de ondas distribuídas aleatoriamente ao longo do tempo de simulação. No entanto verificam-se algumas diferenças destes cenários aleatórios relativamente aos outros, onde as séries foram ordenadas por critérios de altura de onda e direcção. A conclusão imediata é a de que a evolução da linha de costa é influenciada pela forma como os eventos de ondas individuais são distribuídos pelas séries sintéticas, ou seja, uma série de dados onde sejam distribuídas ondas com as mesmas características de forma contínua durante o seu período de ocorrência, gera resultados diferentes do que quando essas mesmas ondas são distribuídas aleatoriamente.

Uma série sintética de ondas distribuída aleatoriamente ao longo do período de simulação pode ainda, conforme demonstrado, ser tomada como uma linha de referência para uma média dos outros cenários estudados, ou vice-versa.

Pese embora as diferenças já destacadas no subcapítulo 2.7, dos estudos elaborados por *Le Mehaute, et al., 1983*, e *Hanson, 1987*, onde estes fazem variar separadamente as características de onda nas séries sintéticas do clima de agitação e efectuam simulações em domínios de cálculo diferentes daquele utilizado neste estudo, verifica-se que as conclusões alcançadas por ambos, são aqui atestadas. Ambos sublinham a sensibilidade na evolução da linha de costa quando se faz variar a ordem de uma série sintética de clima de agitação, bem como o período de simulação, onde quanto maior for este, mais a linha de costa simulada tenderá para uma situação de equilíbrio.

A utilização de séries sintéticas para previsão de posições de linha de costa futuras é uma realidade cada vez mais comum. O estudo aqui apresentado conclui que o uso de ondas representativas do clima de agitação pode ser usado para construir séries sintéticas. No entanto, é mais segura a utilização de séries aleatórias construídas com base em ondas representativas. Este tipo de conclusão apenas pode ser extrapolada para futuros estudos se, no mesmo local de estudo se verificar o caudal imposto como condição de *bypass* de  $1,3 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{ano}$ . Não obstante, será de ter em conta as obras de protecção costeira presentes no trecho em análise, pois junto destas, a ordem sequencial de ondas características poderá influenciar os resultados finais de simulação da posição da linha de costa.

Num futuro estudo seria interessante a análise de simulações efectuadas com dados provenientes directamente da bóia-ondógrafo, ou seja, sem qualquer análise estatística realizada a priori, e uma posterior comparação com o estudo aqui realizado, onde se poderia ter em conta aspectos financeiros relacionados com custos, confrontando as vantagens e desvantagens da utilização de dados “originais” ou de dados tratados estatisticamente. Tal análise apenas seria sustentável se no mesmo período se dispusessem das mesmas condições de fronteira.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**Abecasis, F., Castanho, J. P., & Carvalho, J. R. (1957).** *A previsão das características das ondas do mar.* Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

**Aquaveo. (2008).** *Surface Water Modeling System*, GENESIS Tutorial.

**Barata, M.G.O.A.; Teles, M. J.B.S.; Vieira, J.A.R (1996).** *Seleção de Ondas Representativas da Agitação Marítima para efeito da avaliação do transporte litoral na costa de Aveiro.* Recursos Hídricos, Vol 17, no1, pp (43-74).

**Carvalho, J. d., & P., B. J. (1966).** *Agitação marítima na costa oeste de Portugal metropolitano : contribuição para o seu estudo.* Lisboa: LNEC, memória 290.

**Coelho, C. (2005).** *Riscos de exposição de frentes urbanas para diferentes intervenções de defesa costeira.* Tese de Doutoramento, Universidade de Aveiro, Portugal.

**Da Silva, Adélio J. R. (1991).** *Transporte Litoral de Sedimentos.* Tese de Doutoramento em Engenharia Mecânica, Instituto Superior Técnico, Lisboa.

**Galopim de Carvalho, A. M. (2003).** *Geologia Sedimentar, Volume I - Sedimentogénese.* Âncora Editora, Lisboa.

**Hanson, H. (1987).** *GENESIS - A Generalized Shoreline Change Numerical Model for Engineering Use*, Report No. 1007, Department of Water Resources Engineering, University of Lund, Lund, Sweden.

**Hanson, H., & Kraus, N. (1991).** *GENESIS: Generalized Model for Simulating Shoreline Change, Report 1 Technical Reference.* U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.

**Henriques, J.P.V. (2007).** *Coastline Evolution at the South of the Figueira da Foz Harbour.* Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa.

**Carvalho, J. J. Reis de & Barceló, J. P. (1966).** *Agitação marítima na costa Oeste de Portugal Metropolitano - Contribuição para o seu estudo.* LNEC, Memória 290, 34 p., Lisboa.

**Kamphuis, J. W. (1991).** *Alongshore Sediment Transport Rate.* Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, Vol 117, No. 6, pp 624-640.

**Komar, P. D. (1998).** *Beach Processes and Sedimentation* (2nd ed.). Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall.

**Kramer, J. (2005).** *UNIBEST CL+ 6.0, User & Theoretical Manual.* w|j delft hydraulics.

**Le Méhauté, Bernard, Wang, John D. e Lu, Chia-Chi. (1983).** *Wave Data Discretization for Shoreline Processes.* Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, Vol 109, pp. 63-78, No. WW1, pp. 63-78.

**Mota Oliveira, (n.d.).**, *Hidráulica e Obras Marítimas*, (Livro de apoio à disciplina de Hidráulica e Obras Marítimas). Instituto Superior Técnico, Lisboa.

**Sampaio, Maria J. R. T. (2008).** *Aplicação do modelo SWAN na caracterização da agitação marítima na zona adjacente a Pinheiro da Cruz.* Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico, Lisboa.

**Smith, J., & Sherlock, A. (2001).** *STWAVE: Steady-State Spectral Wave Model User's Manual for STWAVE, Version 3.0.* US Army Corps of Engineers, Coastal, and Hydraulics Laboratory, U.S.A.

**TEIXEIRA, A. (2006).** *Evolução da linha litoral a sul do porto da Figueira da Foz – Estudos em modelo matemático*, Lisboa, CEHIDRO (Instituto Superior Técnico).

**U. S. CORP OF ENGINEERS (2006).** Coastal Engineer Manual, CEM Part II, *Coastal Hydrodynamics: Chapter 3.*

**U. S. CORP OF ENGINEERS (2006).** Coastal Engineer Manual, CEM Part III, *Coastal Sediment Processes: Chapter 2.*

**U. S. CORP OF ENGINEERS (2006).** Coastal Engineer Manual, CEM Part IV, *Coastal Geology: Chapter 3.*

**Valle, R., Medina, R., Losada, M. A. (1993).** *Dependence of Coefficient K on Grain Size.* Technical Note N. 3062, Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, Vol 119, No. 5, pp. 568-574.

**Vicente, C. (1990).** *Evolução Costeira devida a Obras Portuárias: Casos da Praia da Figueira da Foz e da Embocadura da Ria de Aveiro.* Porto : 1º Simpósio sobre a Protecção e Revalorização da Faixa Costeira do Minho ao Liz, Porto.

**Website:**

**Htt (1):** <http://www.rickly.com/>

**Htt (2):** [http://www.coastalwiki.org/coastalwiki/Long-term\\_modelling\\_using\\_1-line\\_models\\_-\\_GENESIS\\_and\\_new\\_extensions](http://www.coastalwiki.org/coastalwiki/Long-term_modelling_using_1-line_models_-_GENESIS_and_new_extensions)

**Htt (3):** <http://geo.snirh.pt/snirlit/site/consulta.php?ul=19&ulc=10>

**Htt (4):** <http://www.aprh.pt/rgci/glossario/empolamonda.html>







## ANEXOS

- Anexo A – Quadro sumário que caracteriza os esporões implantados no local de estudo
- Anexo B – Convenções angulares utilizadas na modelação
- Anexo C – Espectros de onda
- Anexo D - Resultado exemplo Bolsa
- Anexo E – Resultados da Calibração do modelo GENESIS
- Anexo F – Resultados do modelo STWAVE
- Anexo G – Resultados do modelo GENESIS
- Anexo H – Resultados individuais de cada cenário do modelo GENESIS (Microsoft Excel)
- Anexo I – Resultados do modelo GENESIS onde é comparada a média dos cenários A, B, C e D e a linha do cenário E para t=20anos





# **Anexo A**

Quadro sumário que caracteriza os esporões implantados no local de estudo



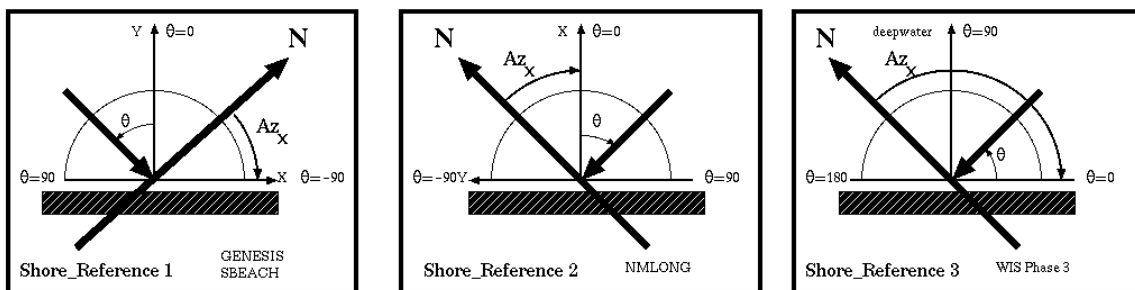
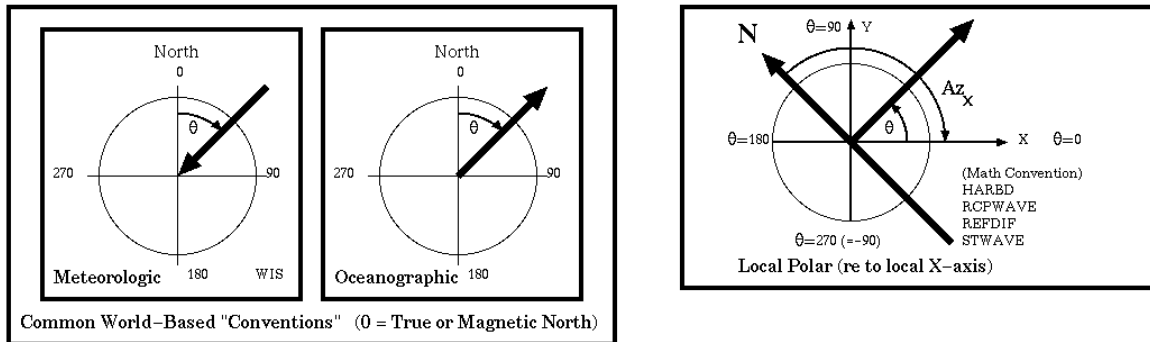
Obra	Índice	Posição Geodésica UTM WSG84 (m)				Coordenadas Locais GENESIS (m)				Comprimento (m)	Permeabilidade
		M1	P1	M2	P2	X1	Y1	X2	Y2		
<b>Costa de Lavos</b>	1	512258,55	4437852,87	514093,47	4437852,87	-12,5	0	-12,5	1834,92	179	0
<b>Cova-Gala</b>	2	512258,55	4441652,87	512990,01	4441652,87	3787,5	0	3787,5	731,46	160	0
<b>Cova-Gala</b>	3	512258,55	4441852,87	512903,75	4441852,87	3987,5	0	3987,5	645,2	102	0
<b>Cova-Gala</b>	4	512258,55	4442052,87	512887,82	4442052,87	4187,5	0	4187,5	629,27	141	0
<b>Cova-Gala</b>	5	512258,55	4442277,87	512830,51	4442277,87	4412,5	0	4412,5	571,96	114	0
<b>Cova-Gala</b>	6	512258,55	4442502,87	512799,61	4442502,87	4637,5	0	4637,5	541,06	84	0
<b>Molhe Sul Figueira Da Foz</b>	7	512258,55	4443477,87	513614,56	4443477,87	5612,5	0	5612,5	1356,01	912	0



# **Anexo B**

Convenções angulares utilizadas na modelação





Local Shore-Based Model "Conventions"

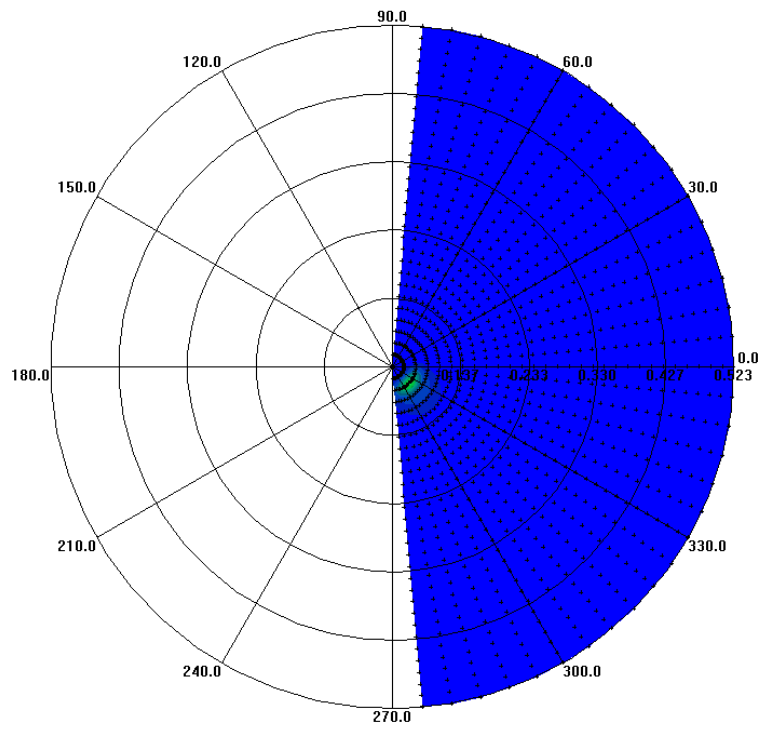




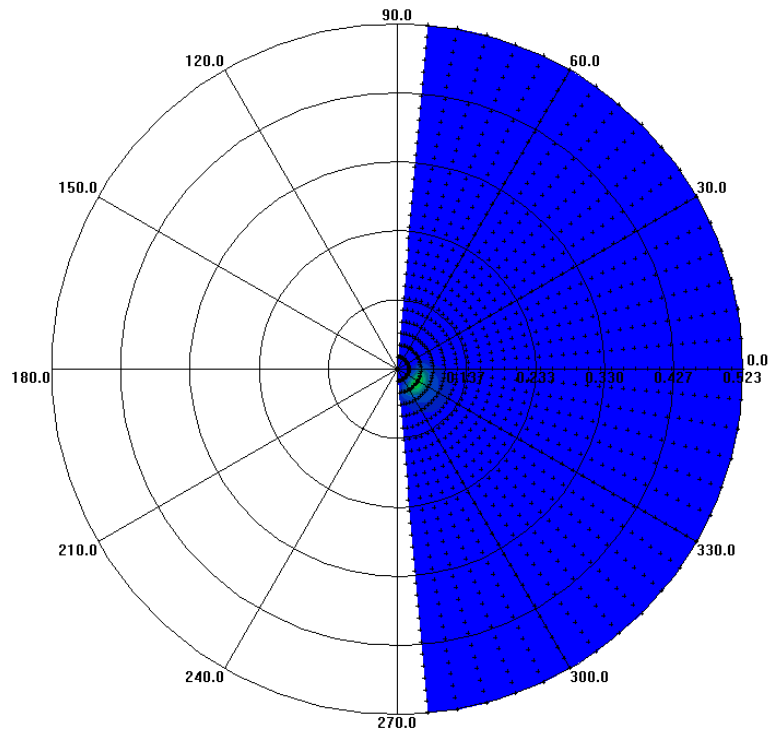
# **Anexo C**

Espectros de onda

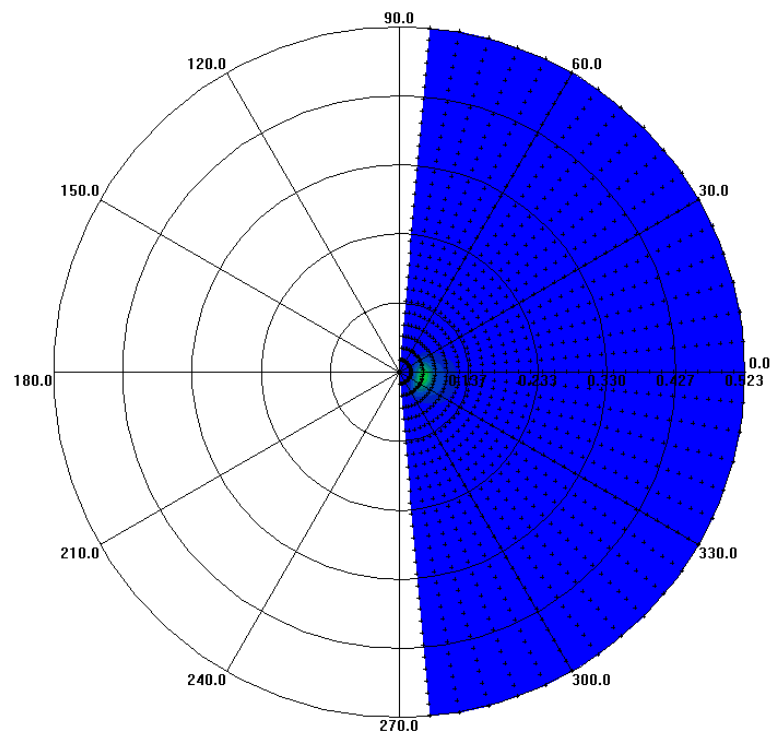




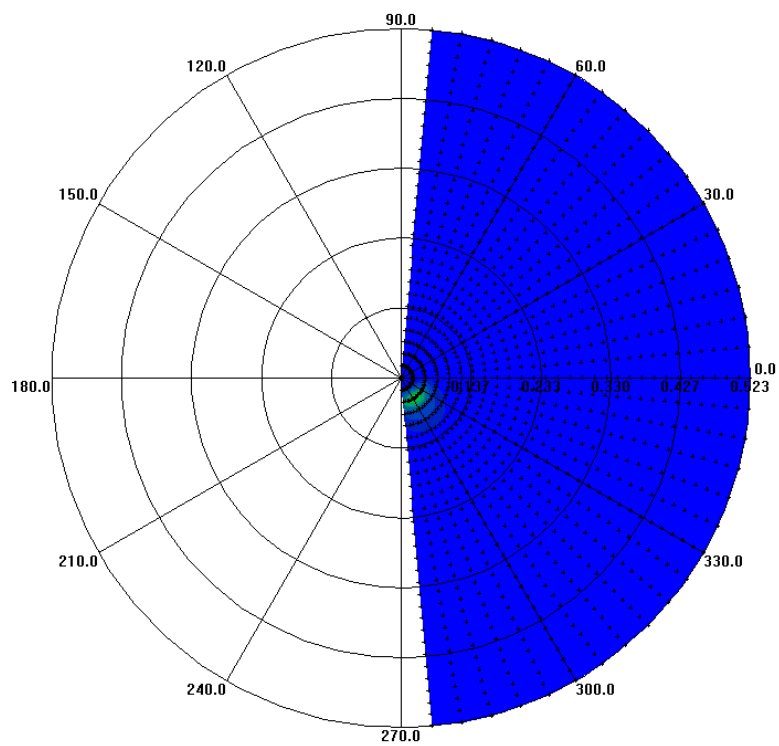
**Figura 0.1 – Espectro da onda 1**



**Figura 0.2 – Espectro da onda 2**



**Figura 0.3 – Espectro da onda 3**



**Figura 0.4 – Espectro da onda 4**

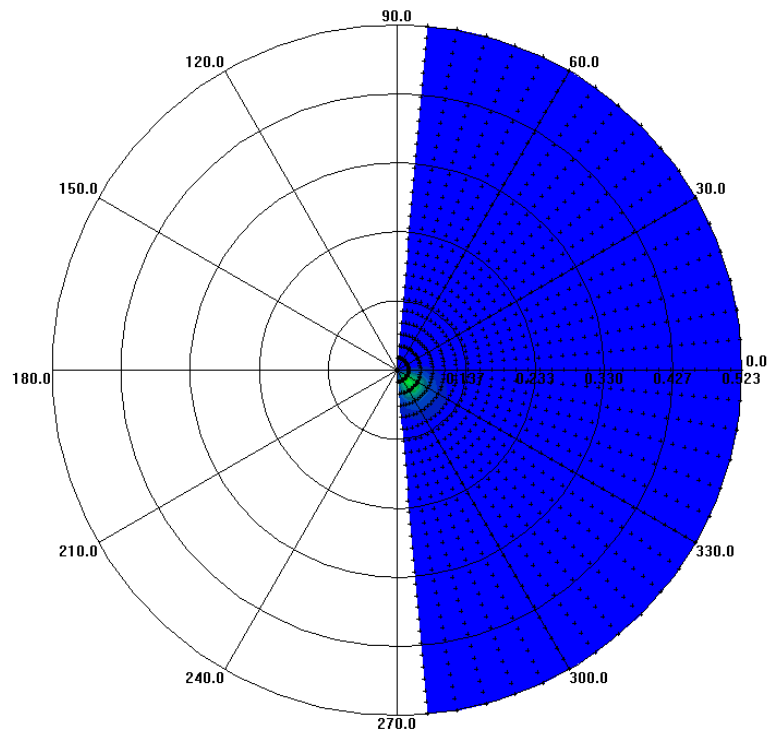


Figura 0.5 – Espectro da onda 5

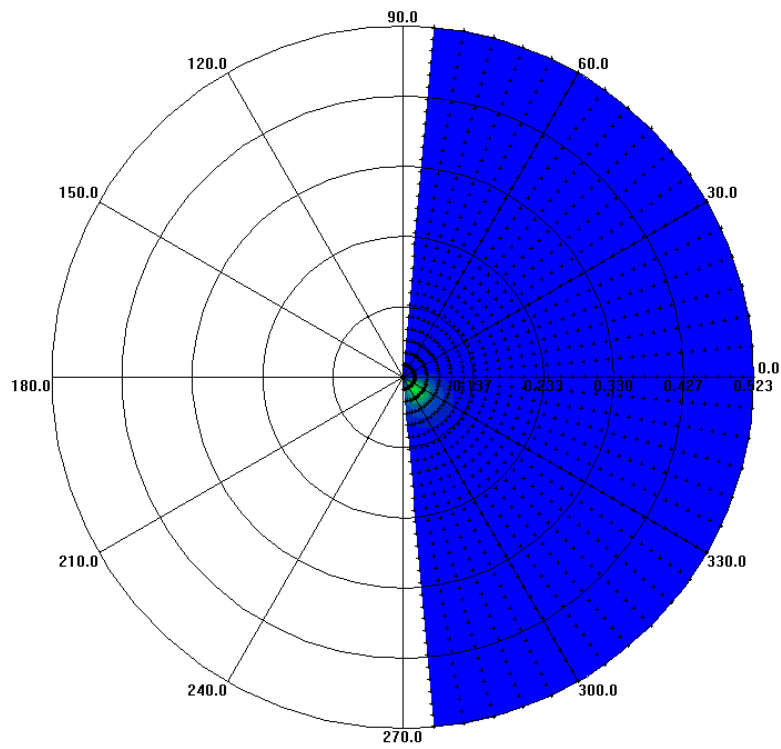


Figura 0.6 – Espectro da onda 6

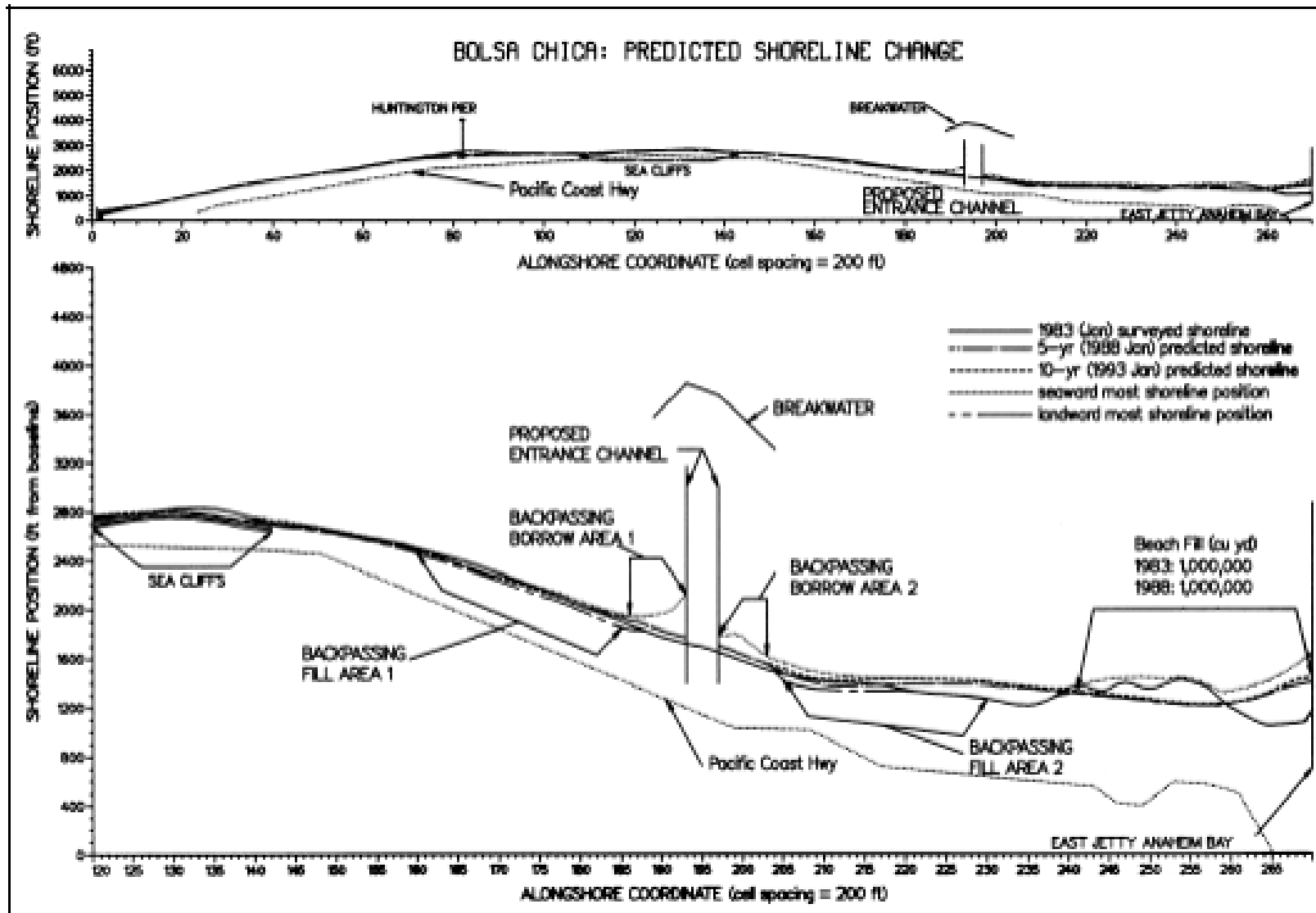


# Anexo D

Resultado ejemplo Bolsa Chica





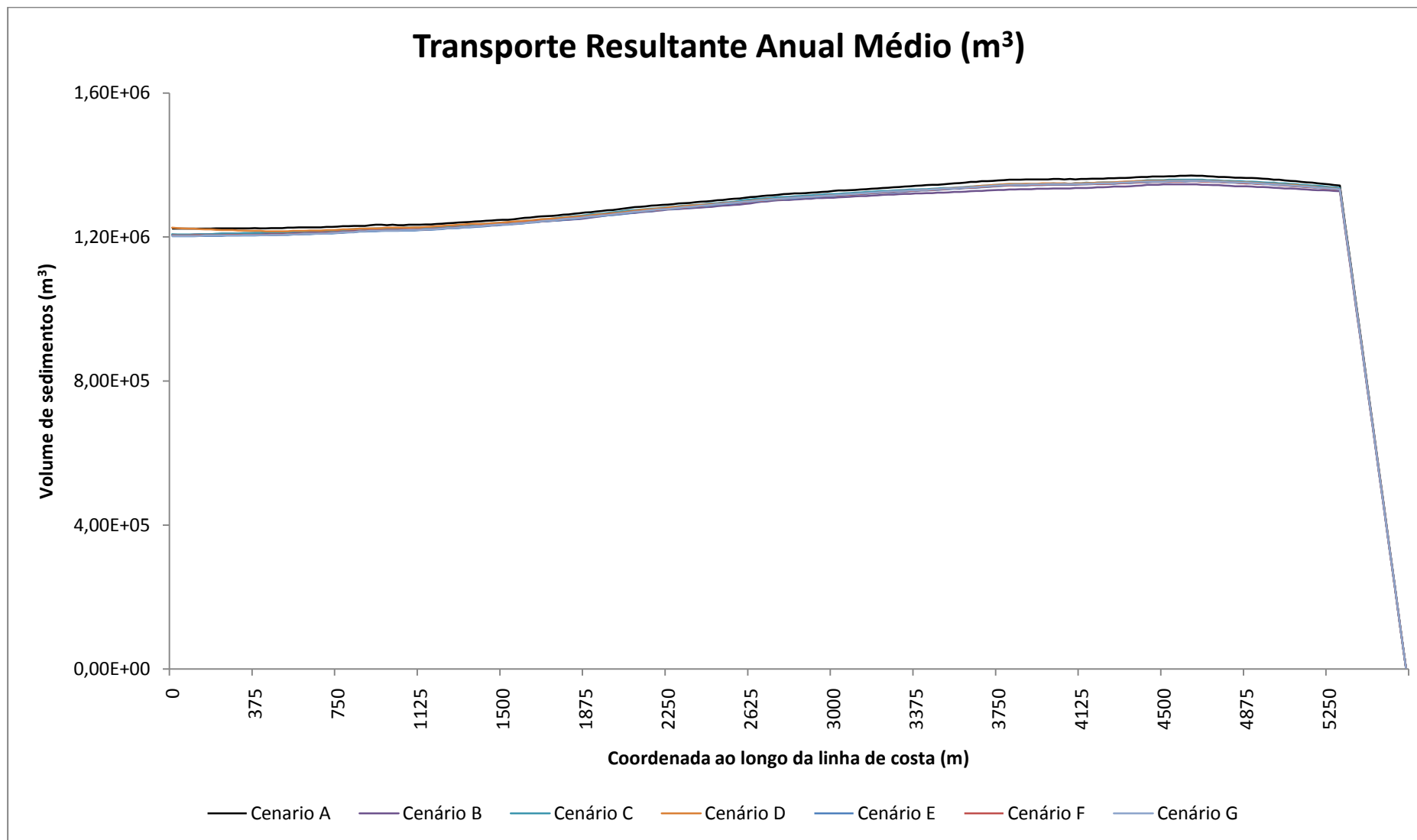




# **Anexo E**

Resultados da calibração do modelo GENESIS





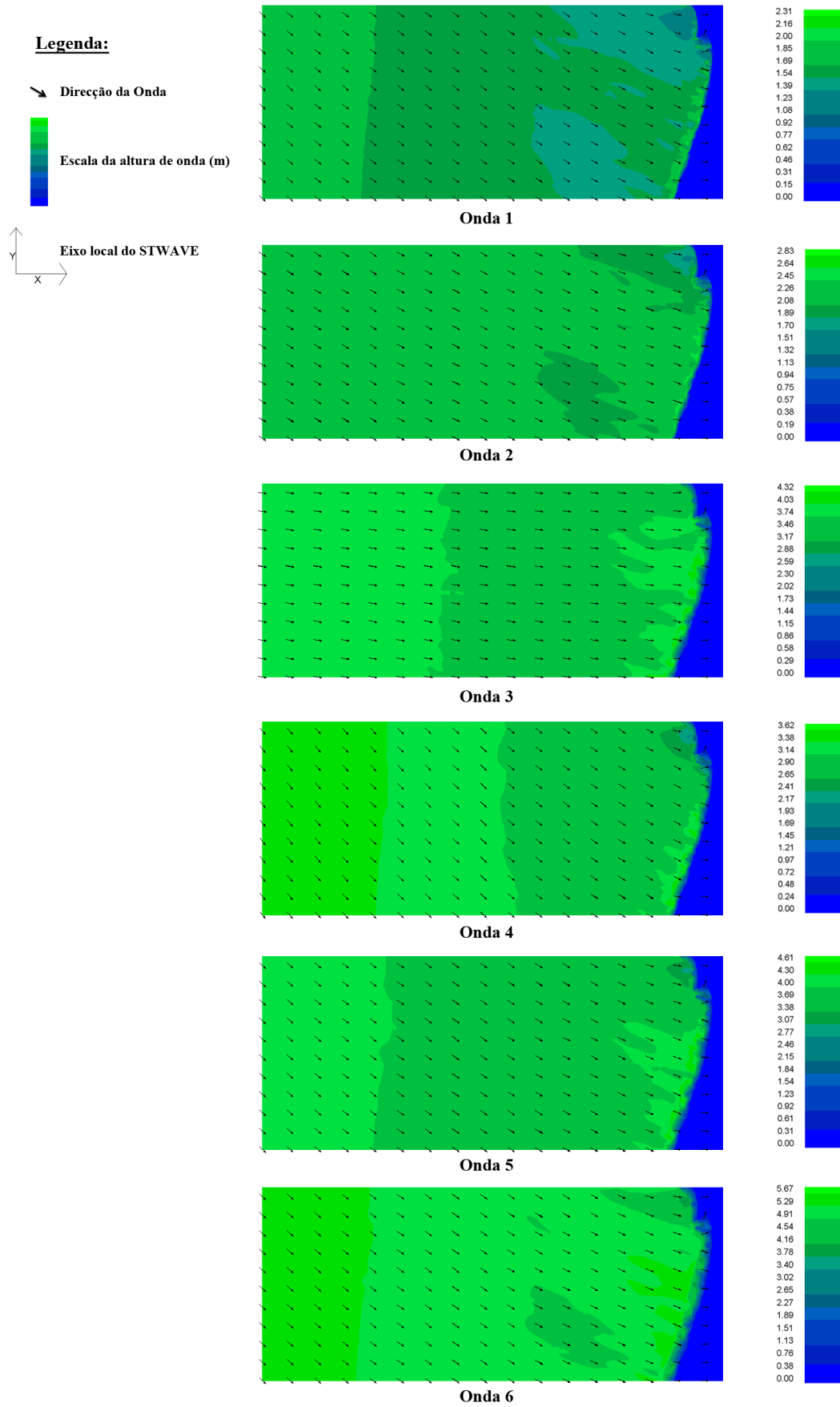


# Anexo F

Resultados do modelo STWAVE





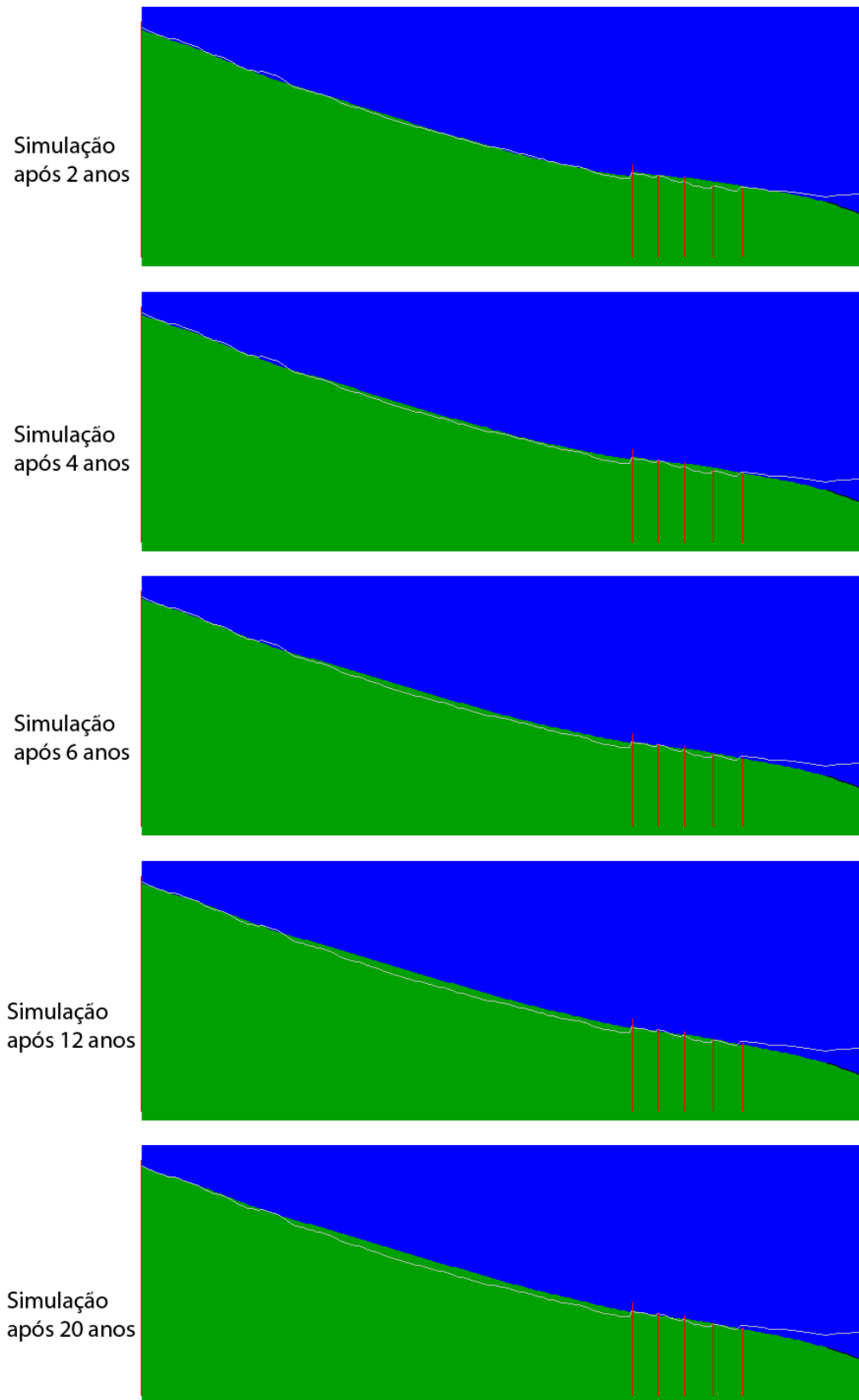




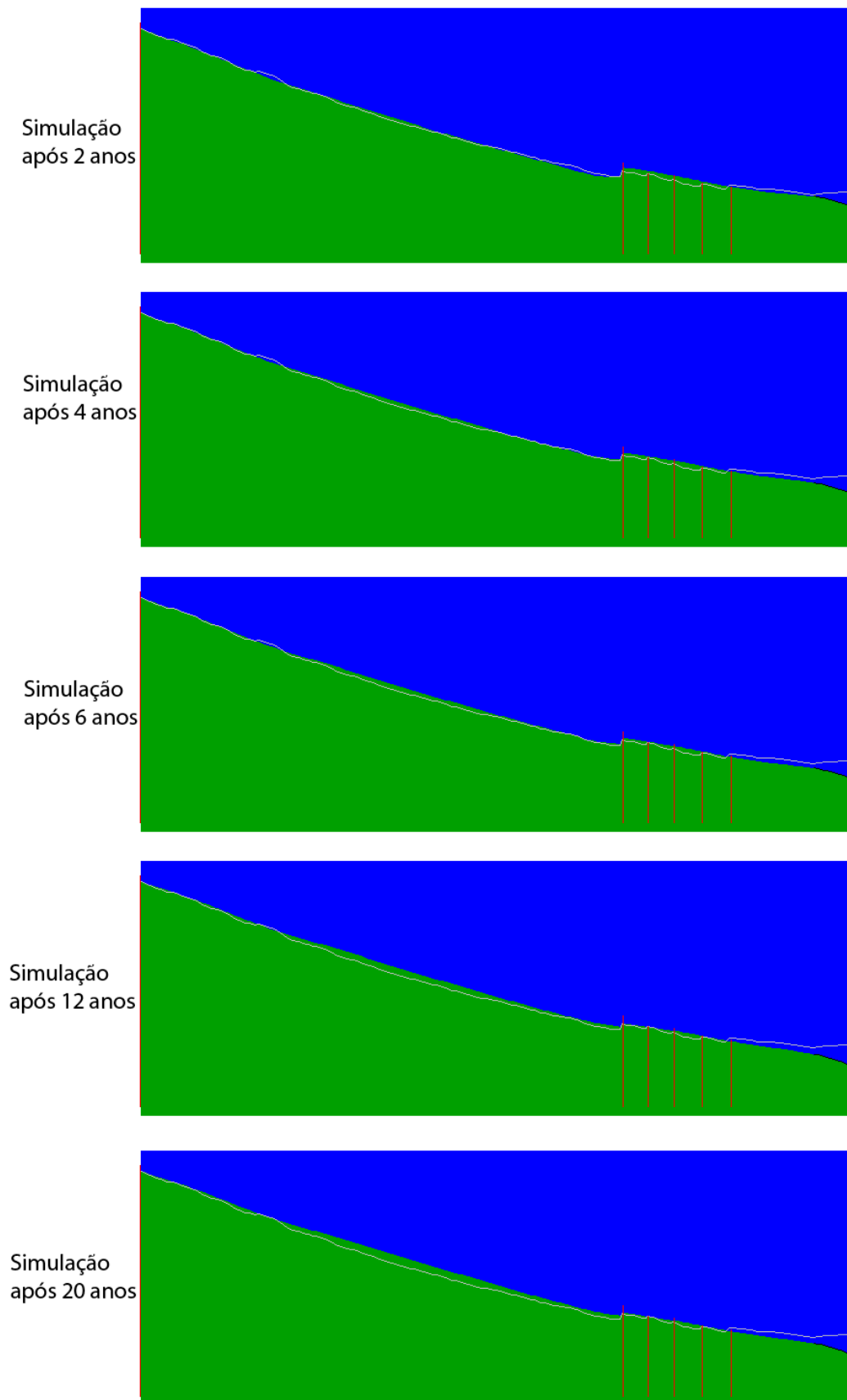
# Anexo G

Resultados do modelo GENESIS





**Figura 0.7 – Resultados do cenário A**



**Figura 0.8 - Resultados do cenário B**

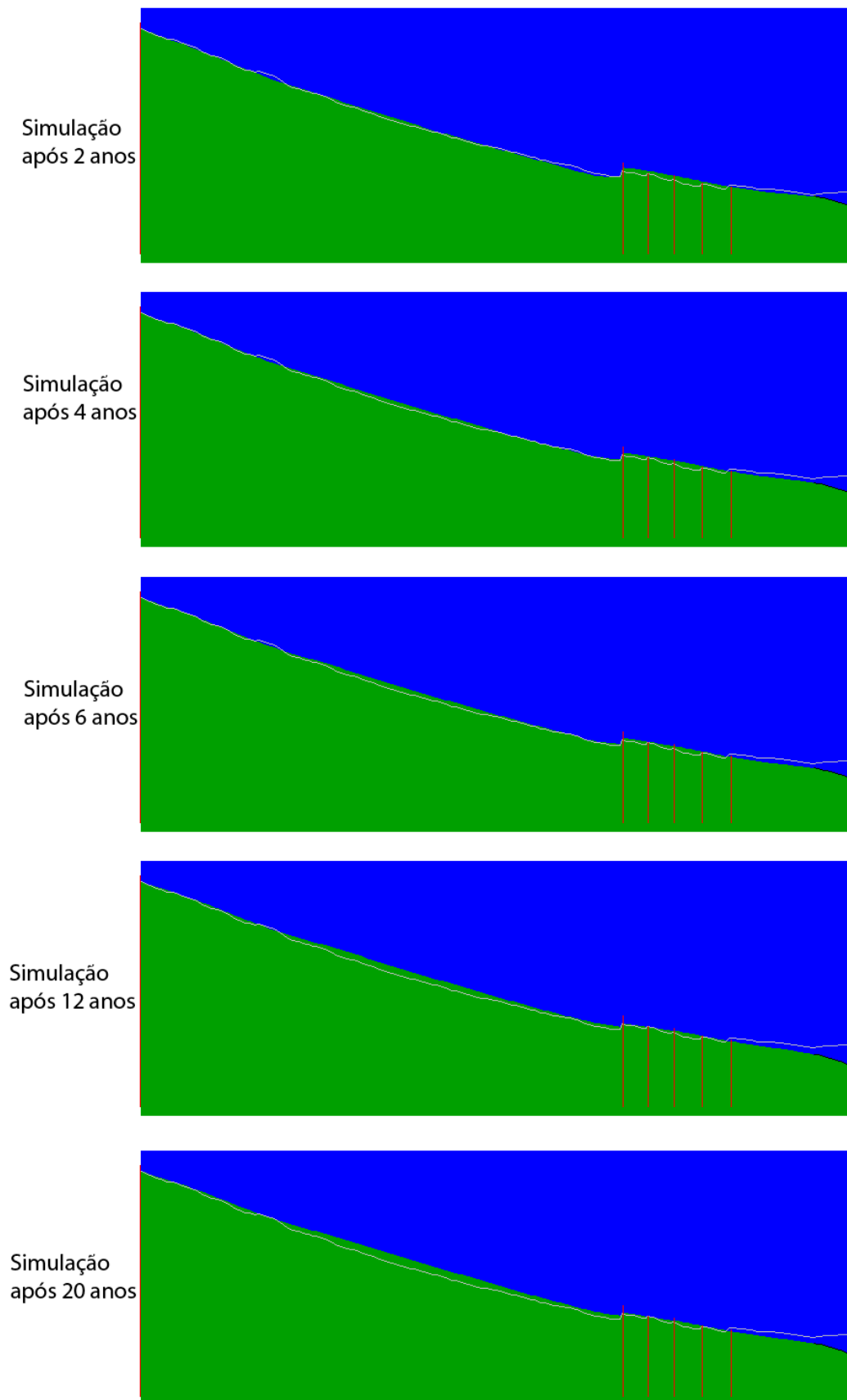
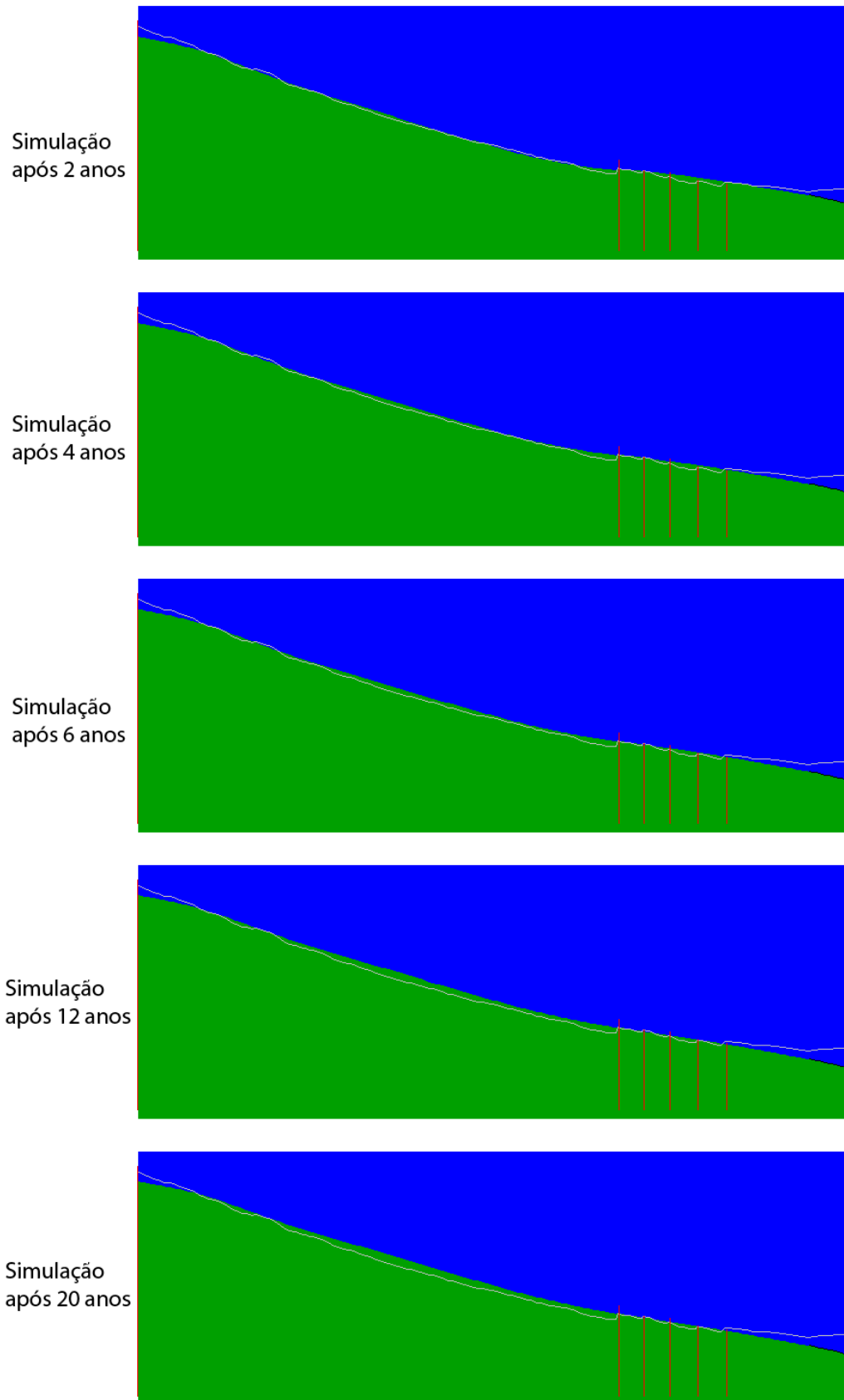


Figura 0.9 - Resultados do cenário C



**Figura 0.10 - Resultados do cenário D**



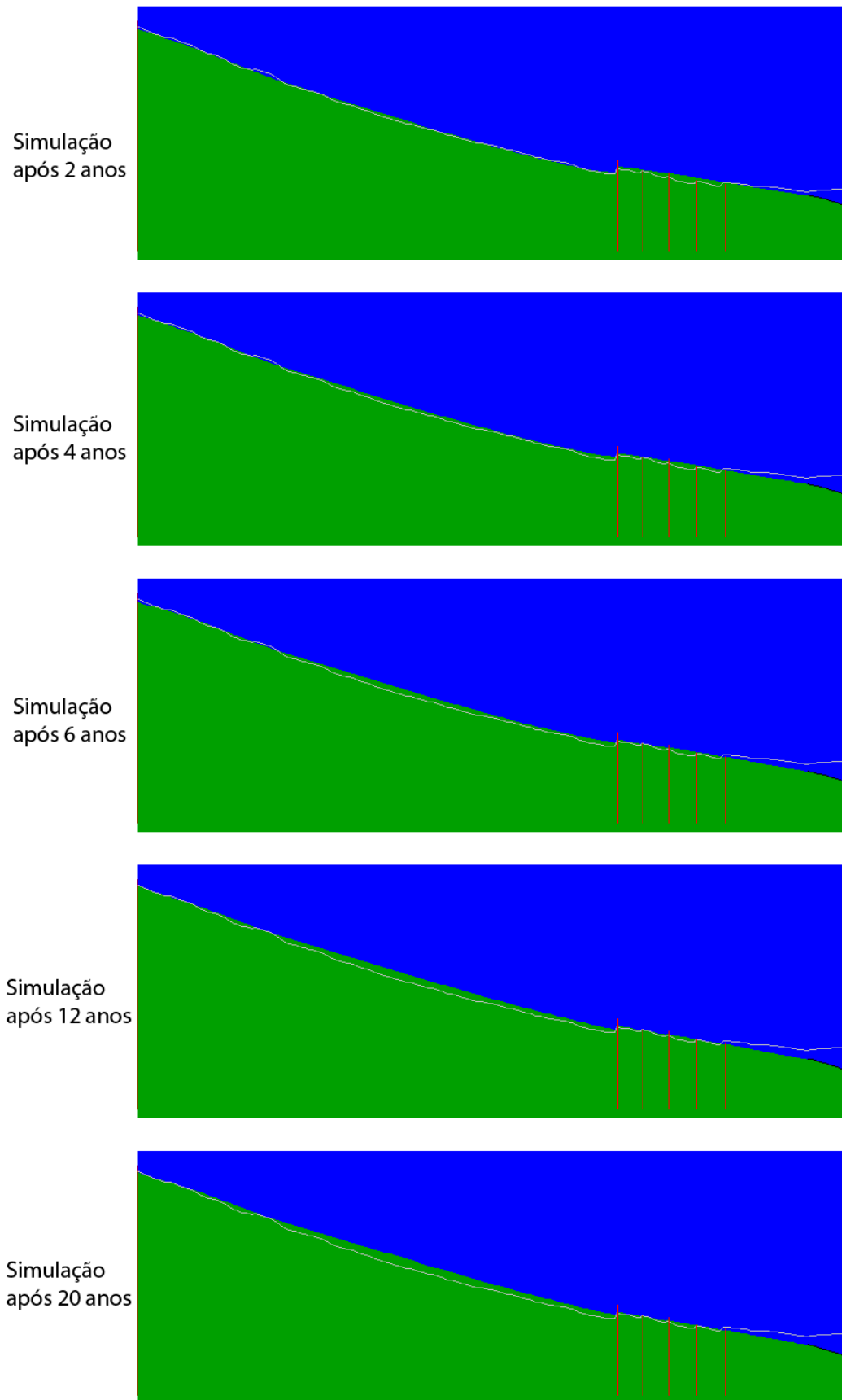


Figura 0.11 – Resultados do Cenário E

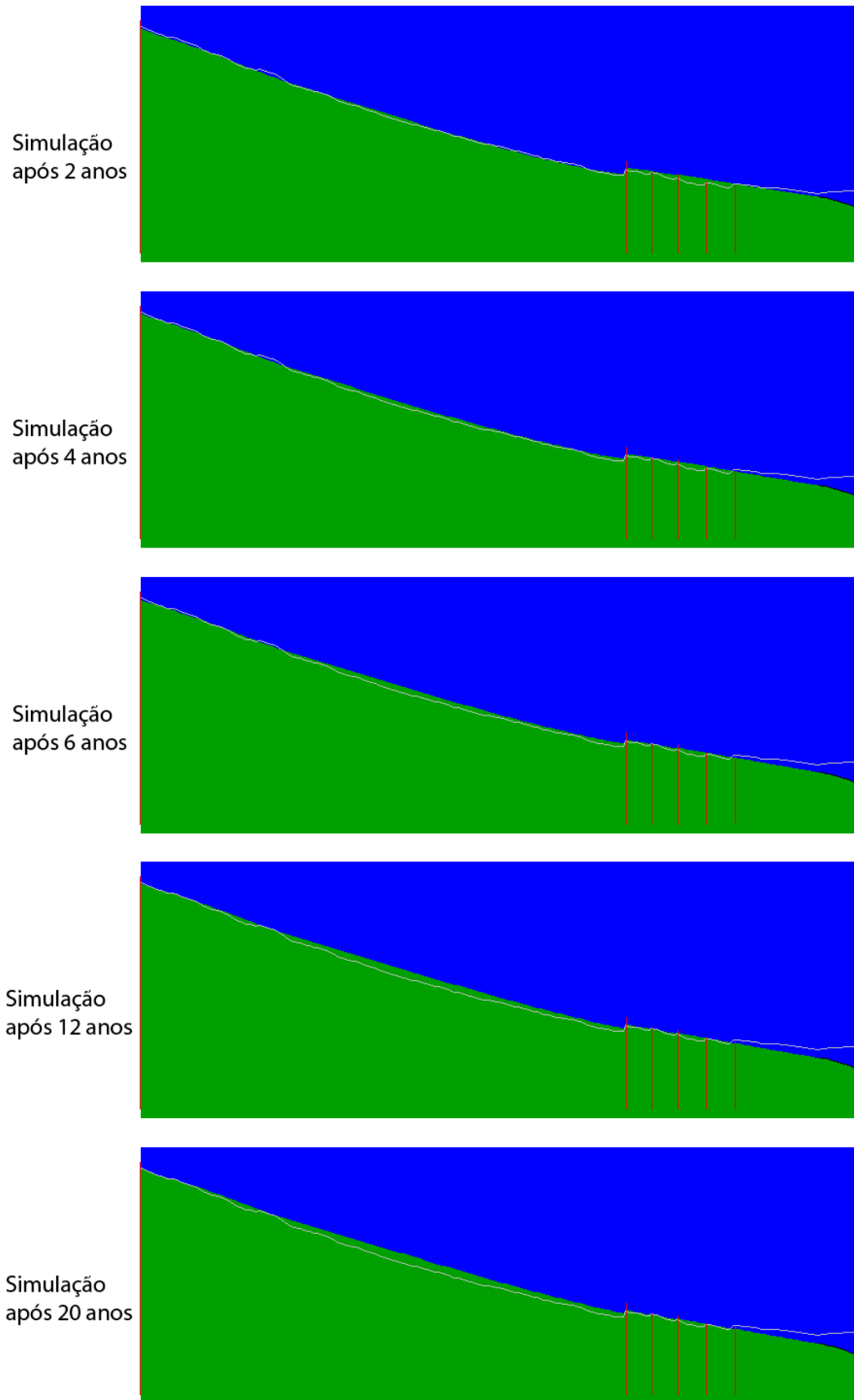
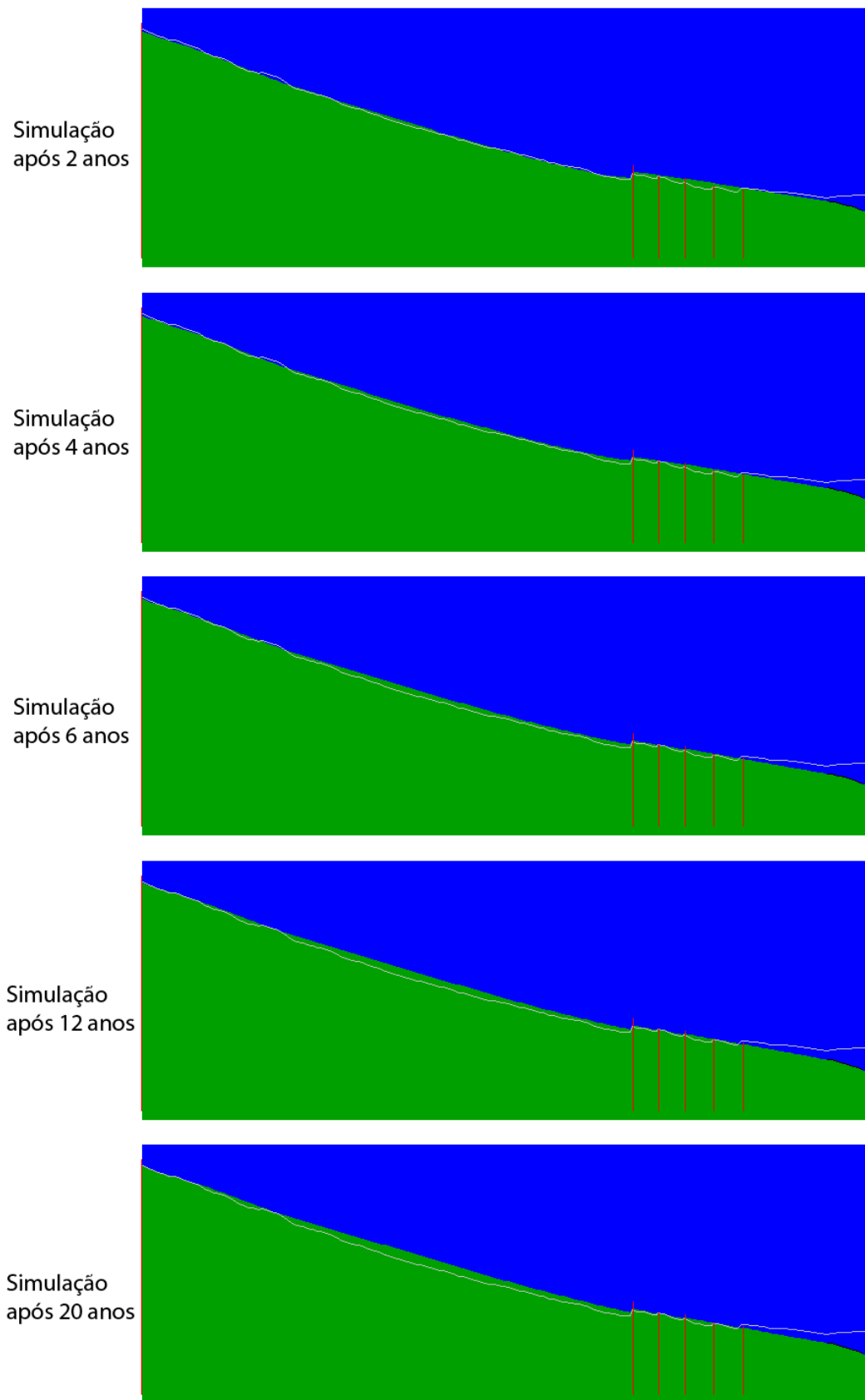


Figura 0.12 - Resultados do Cenário F



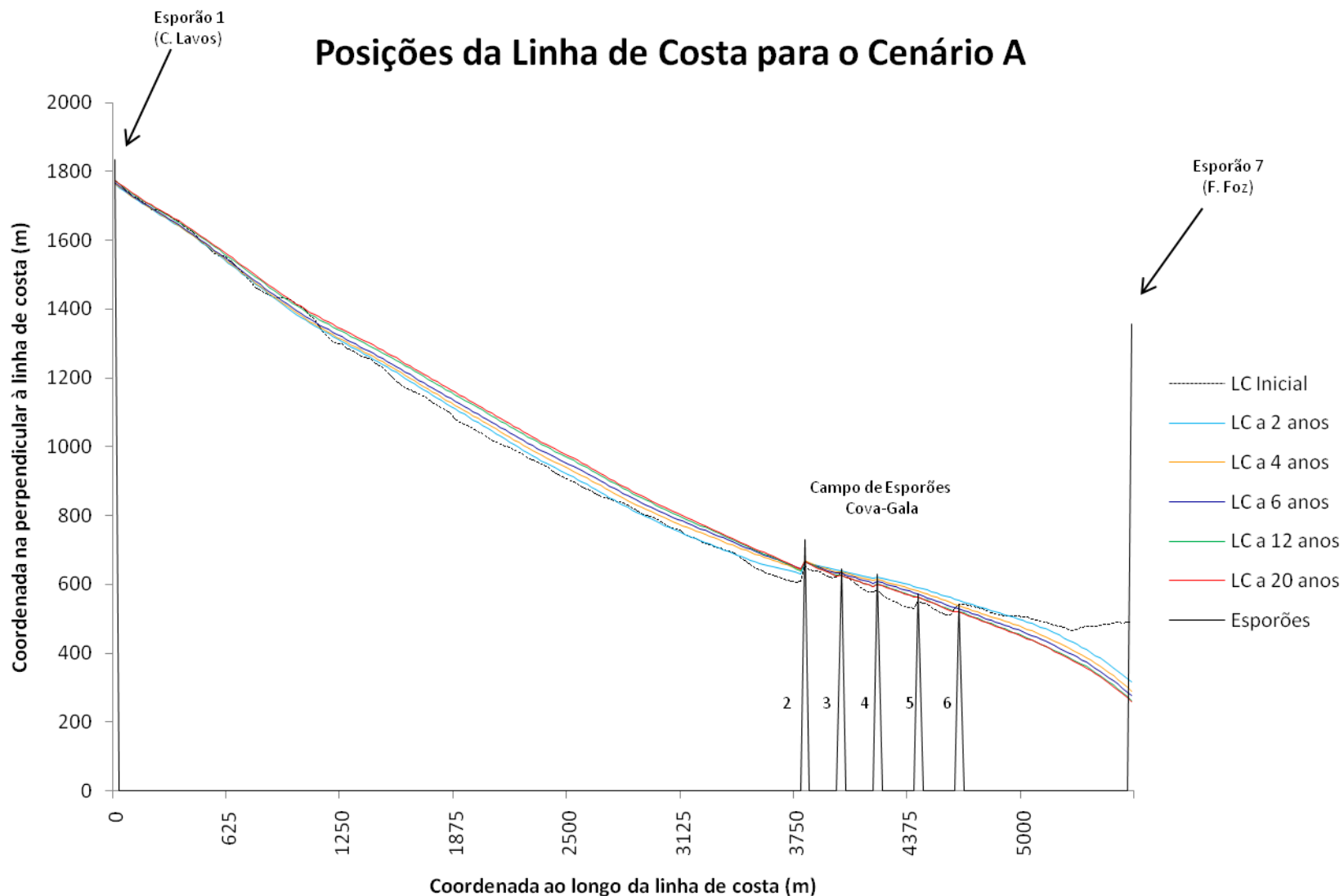
**Figura 0.13 - Resultados do Cenário G**



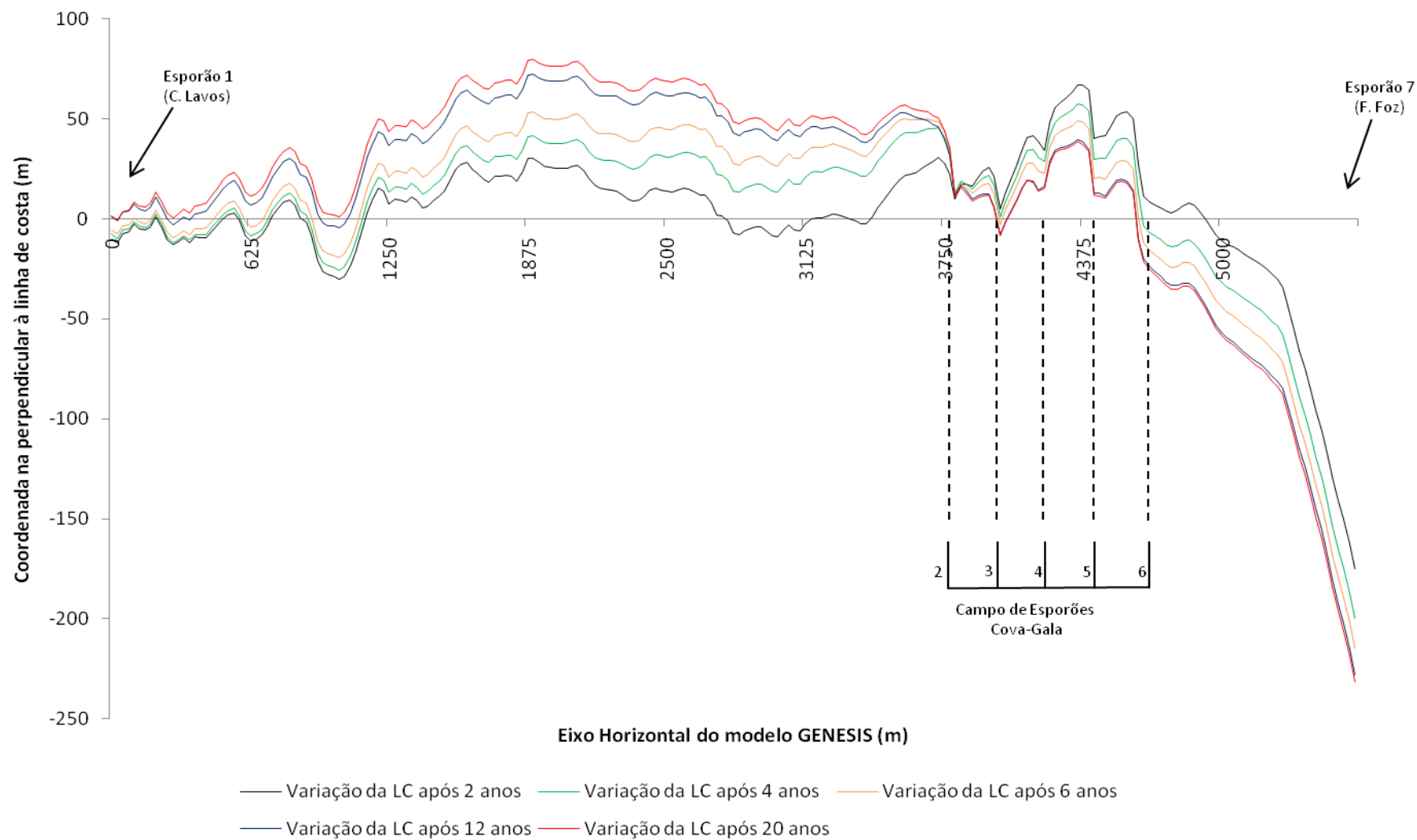
# Anexo H

Resultados individuais de cada cenário do modelo GENESIS (Microsoft Excel)

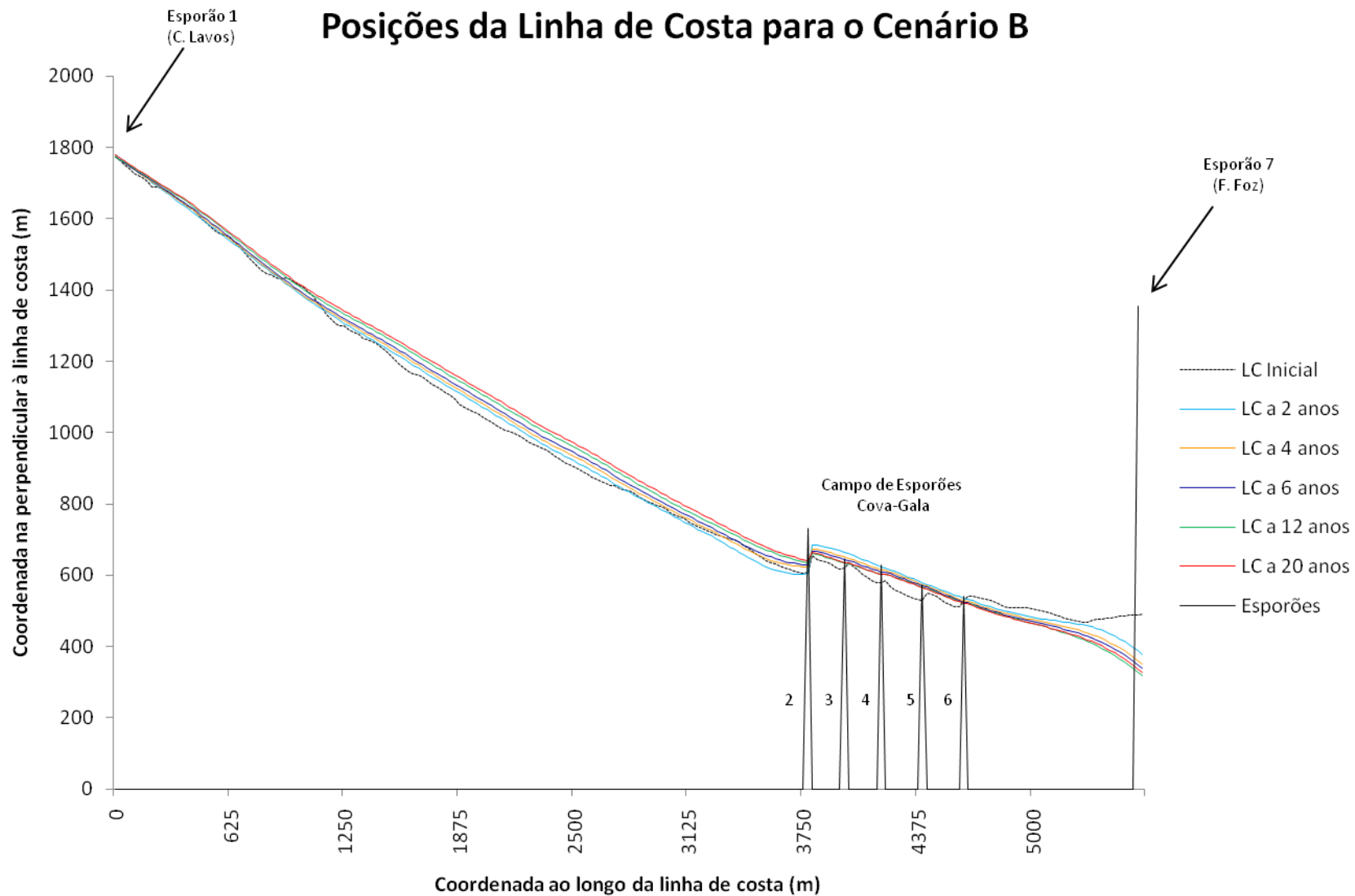




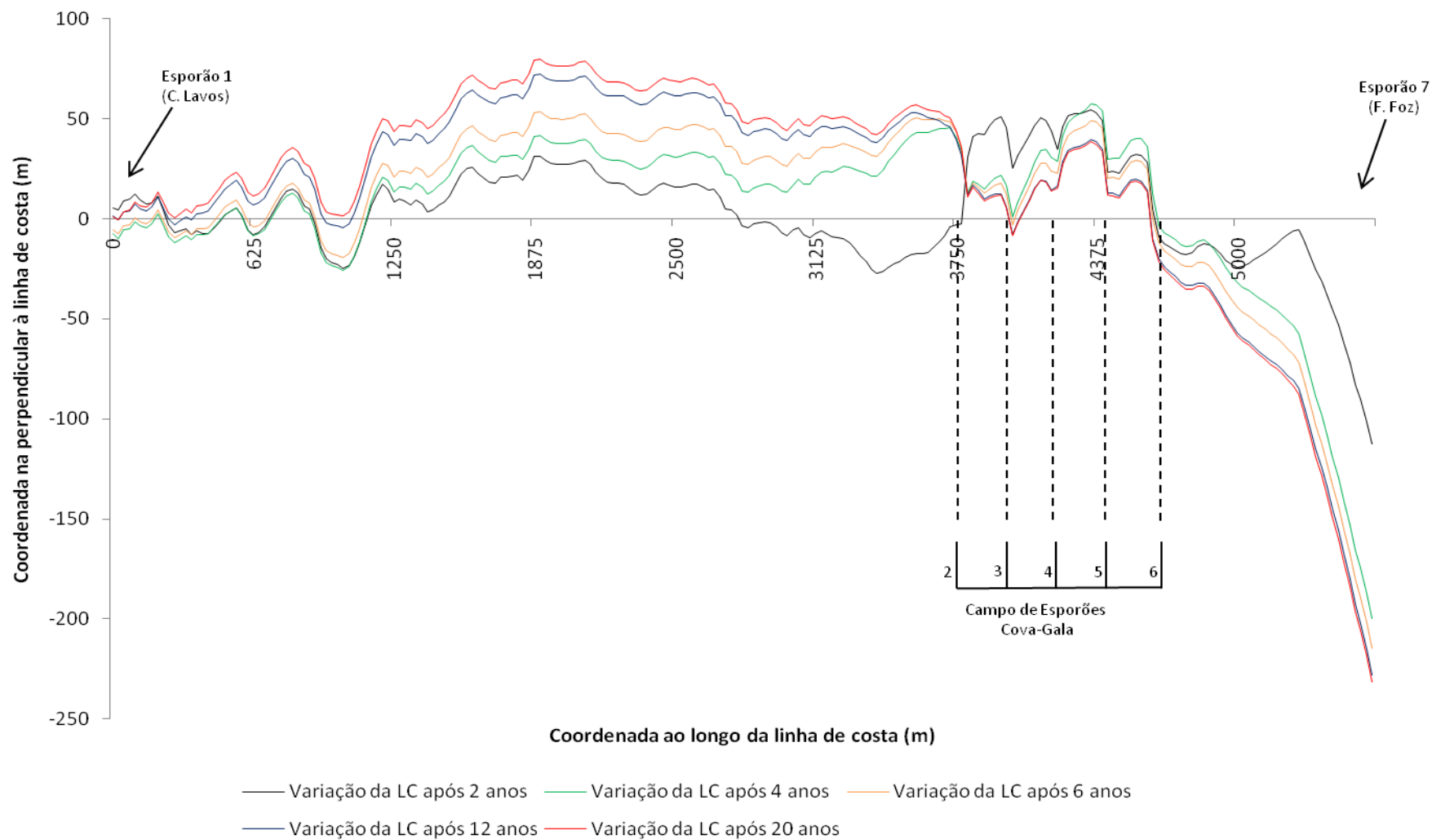
## Avanços e recuos da Linha de Costa para o Cenário A



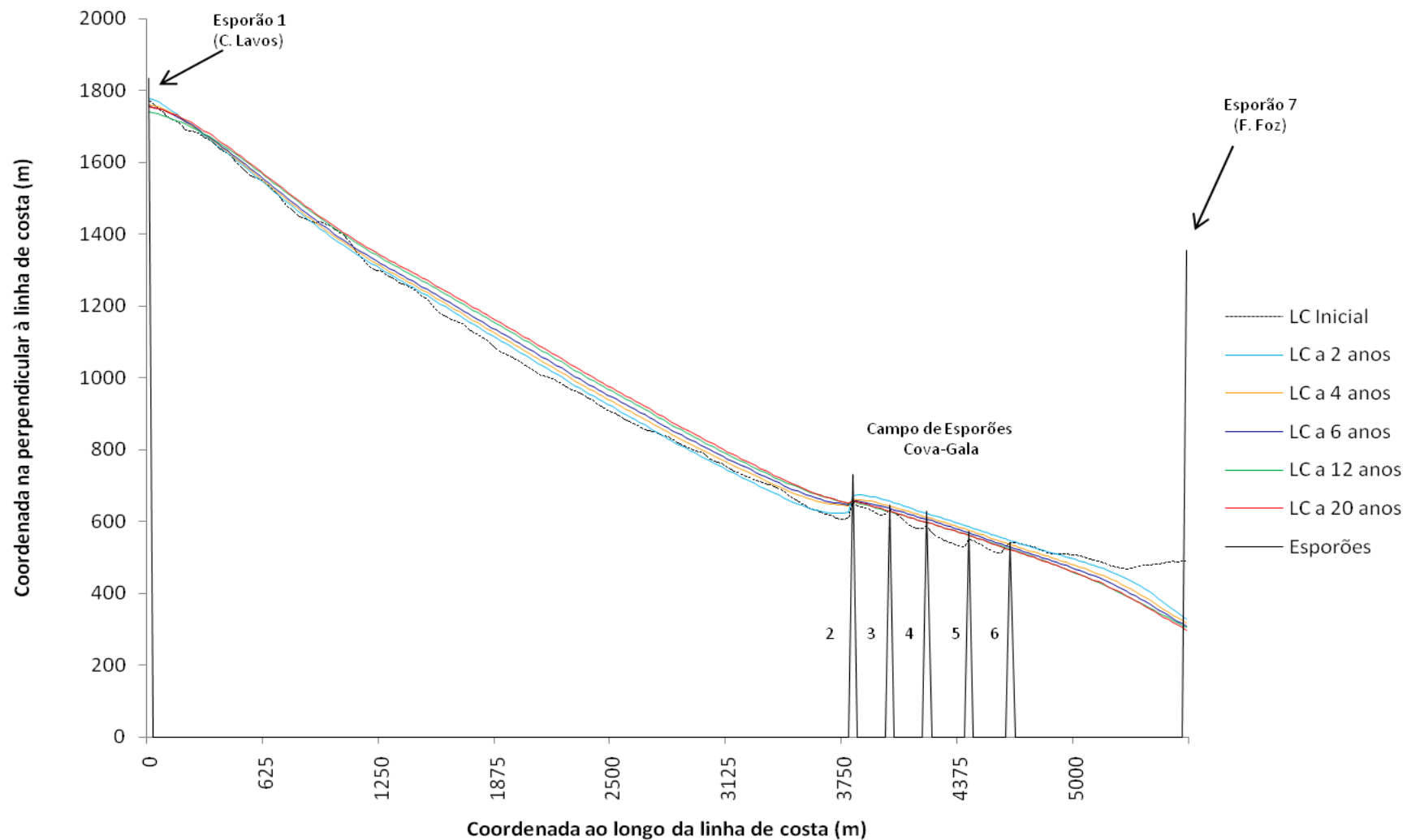




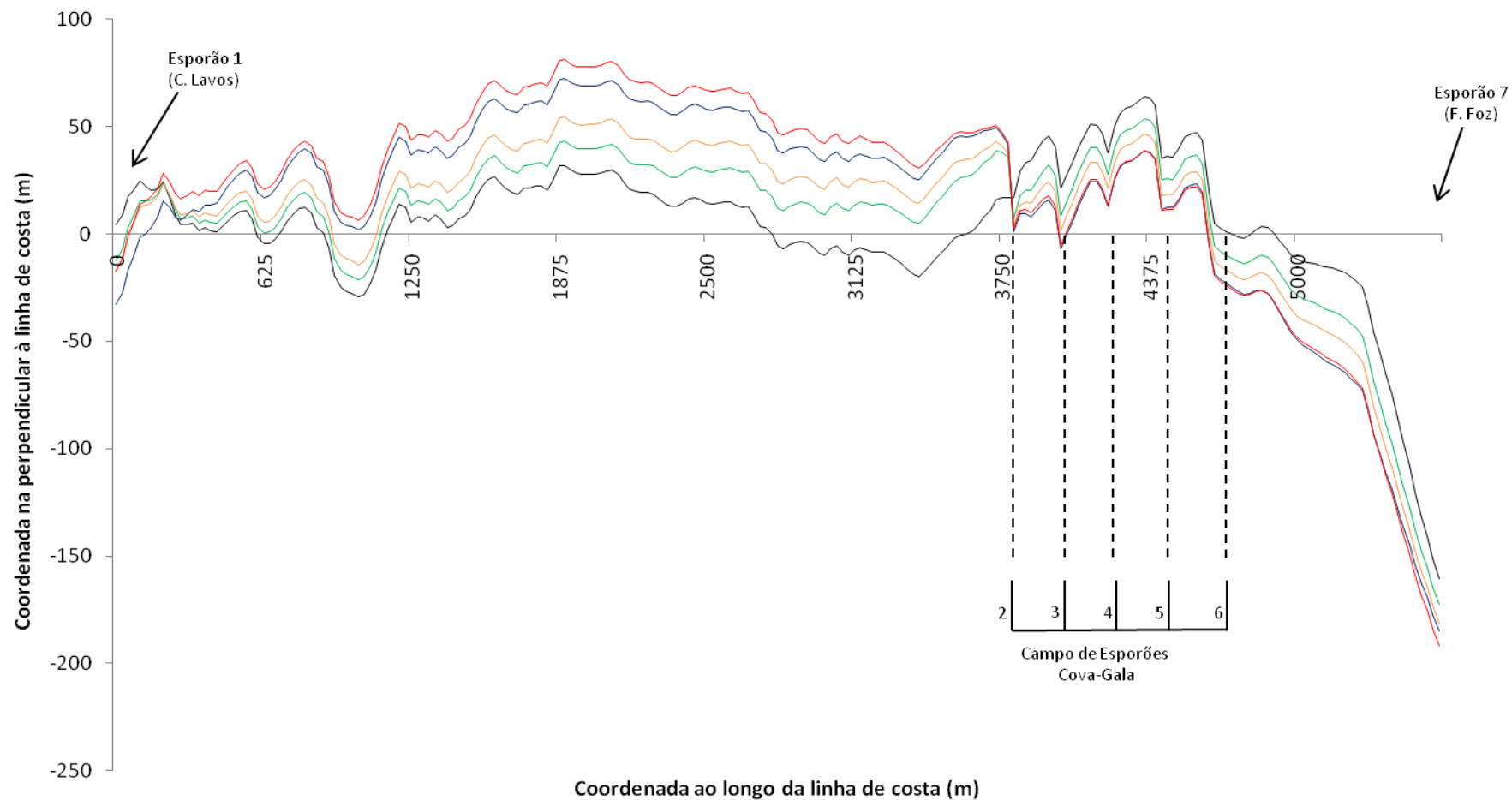
## Avanços e recuos da Linha de Costa para o Cenário B



### Posições da Linha de Costa para o Cenário C

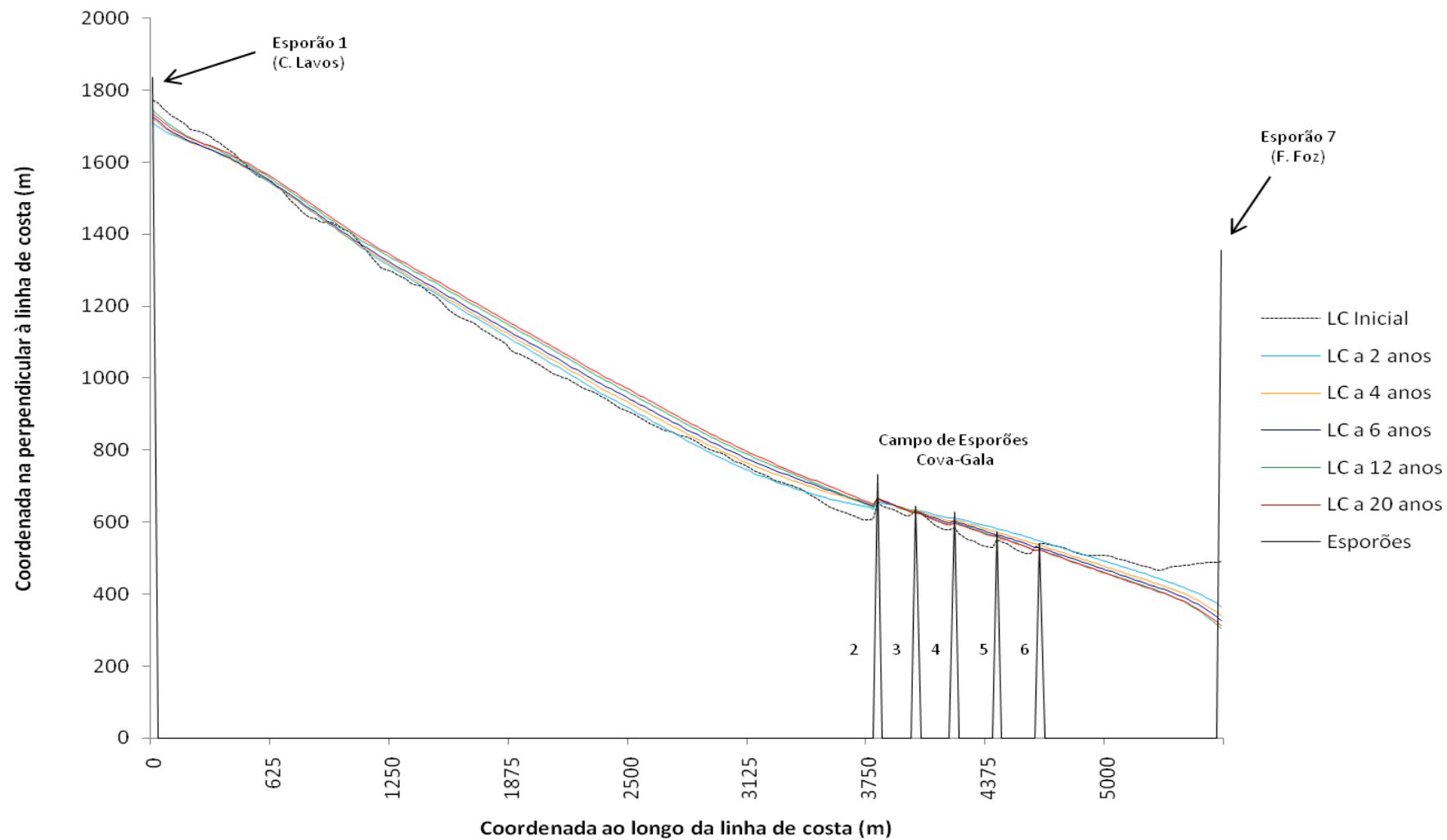


## Avanços e recuos da Linha de Costa para o Cenário C

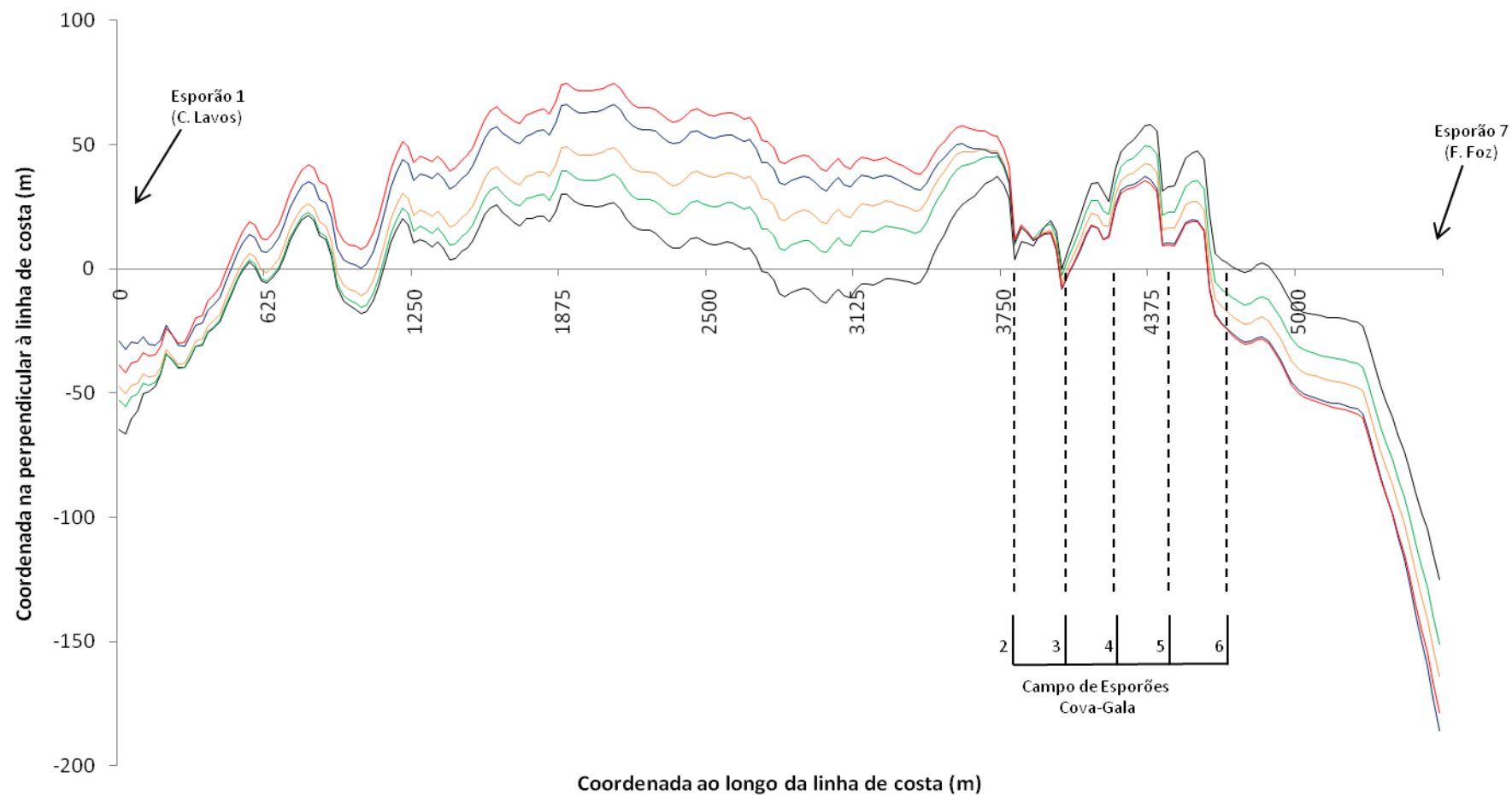


— Variação da LC após 2 anos — Variação da LC após 4 anos — Variação da LC após 6 anos  
 — Variação da LC após 12 anos — Variação da LC após 20 anos

## Posições da Linha de Costa para o Cenário D

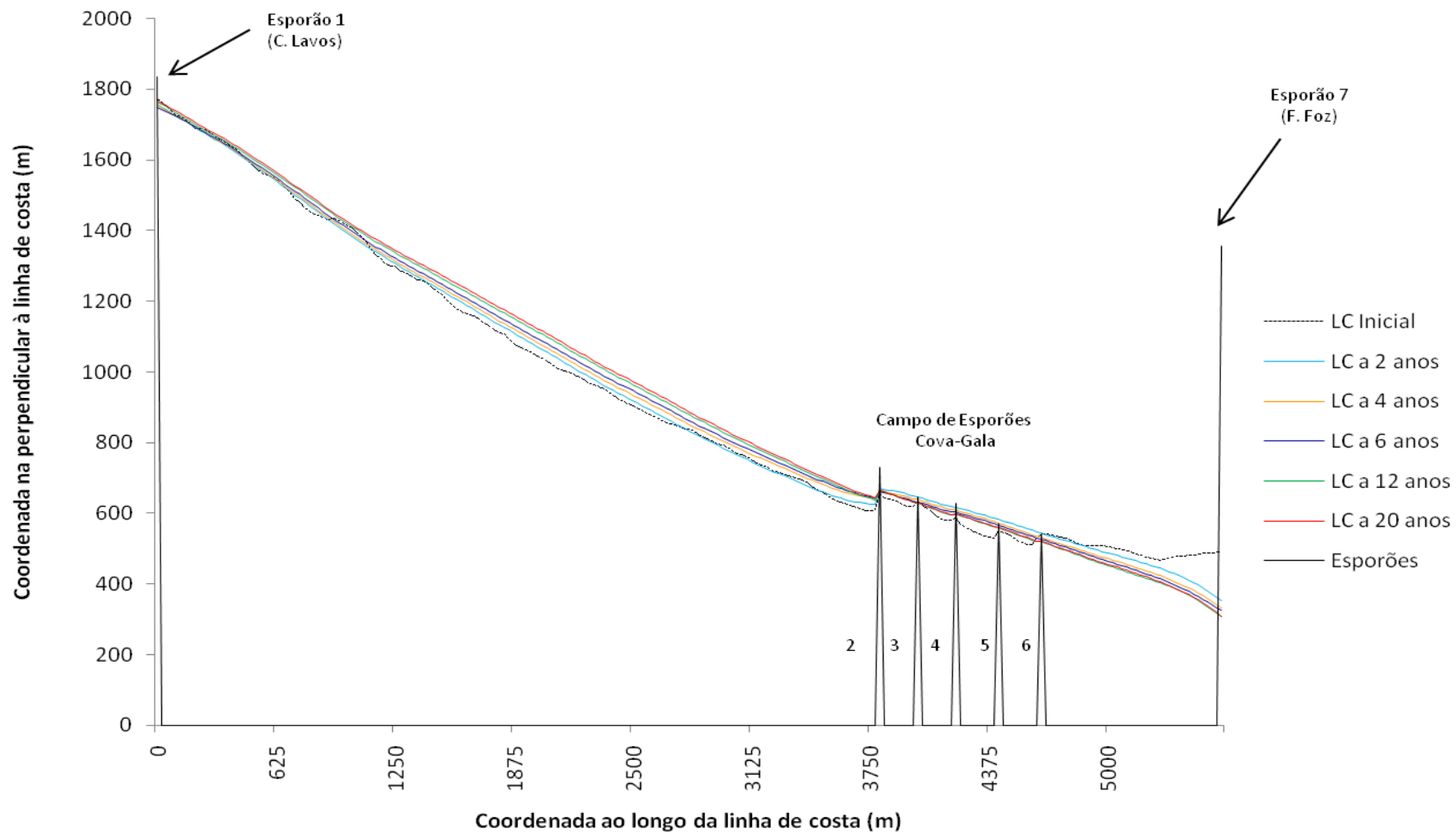


## Avanços e recuos da Linha de Costa para o Cenário D

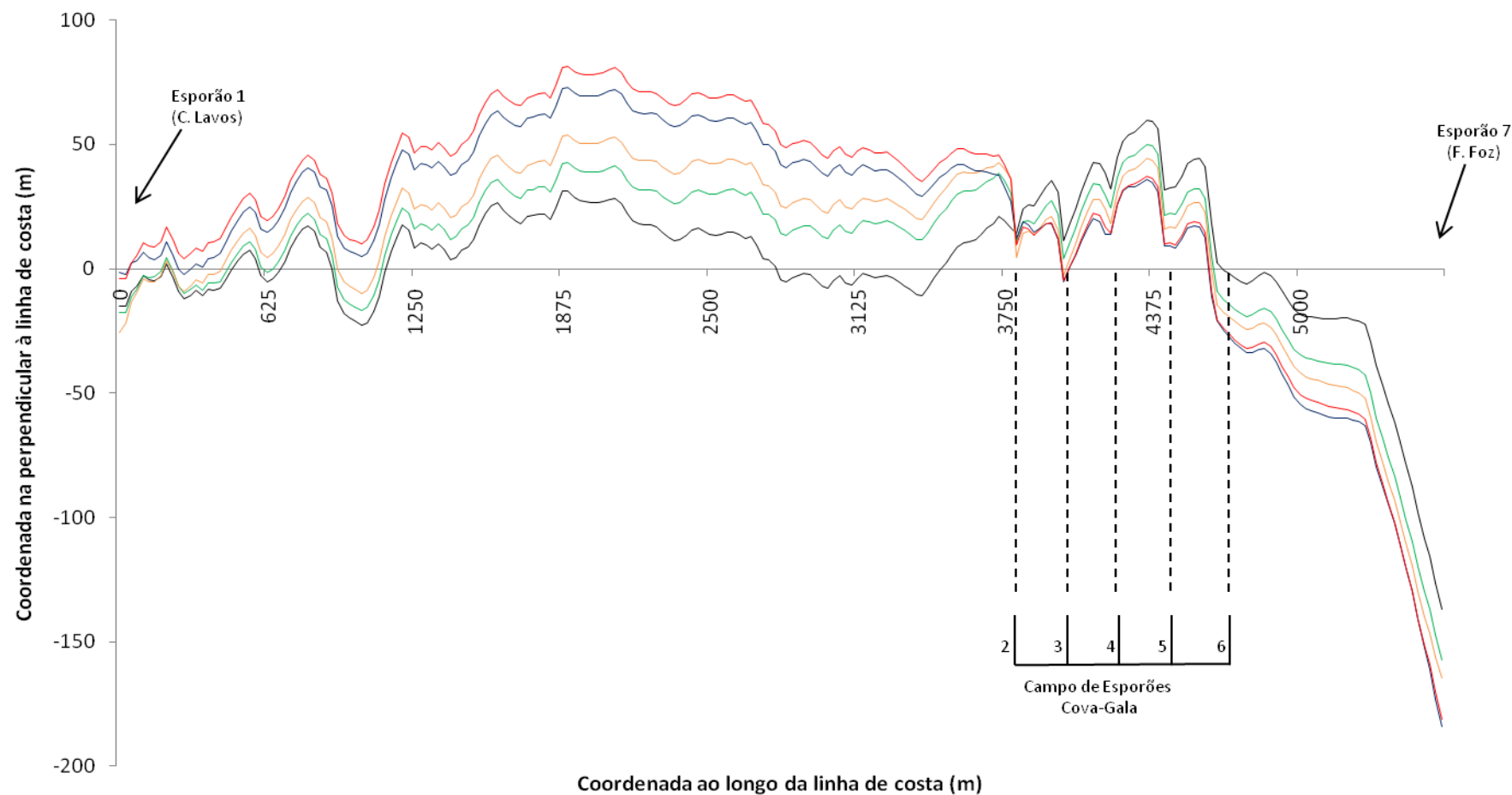


— Variação da LC após 2 anos — Variação da LC após 4 anos — Variação da LC após 6 anos  
 — Variação da LC após 12 anos — Variação da LC após 20 anos

## Posições da Linha de Costa para o Cenário E



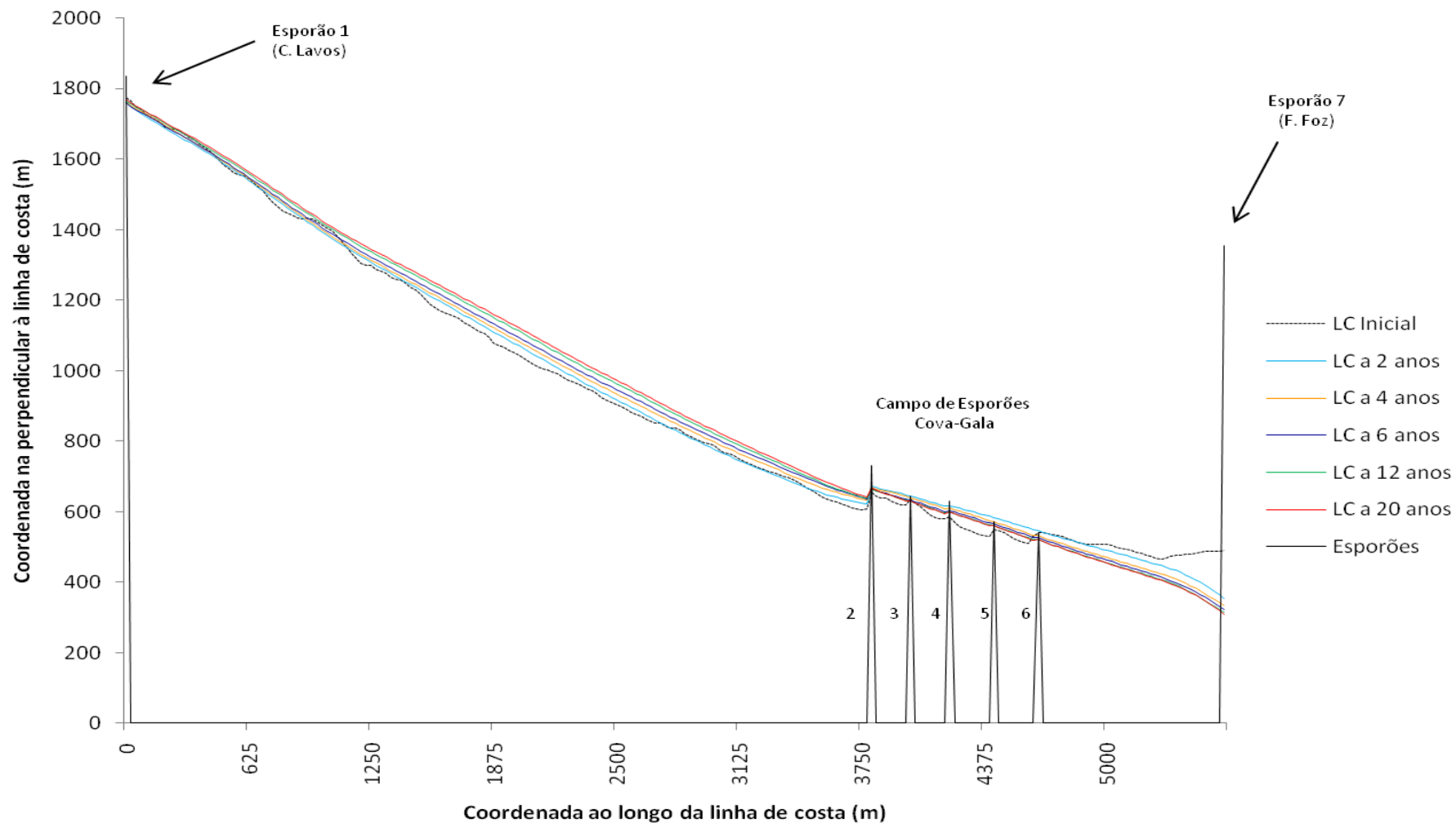
## Avanços e recuos da Linha de Costa para o Cenário E



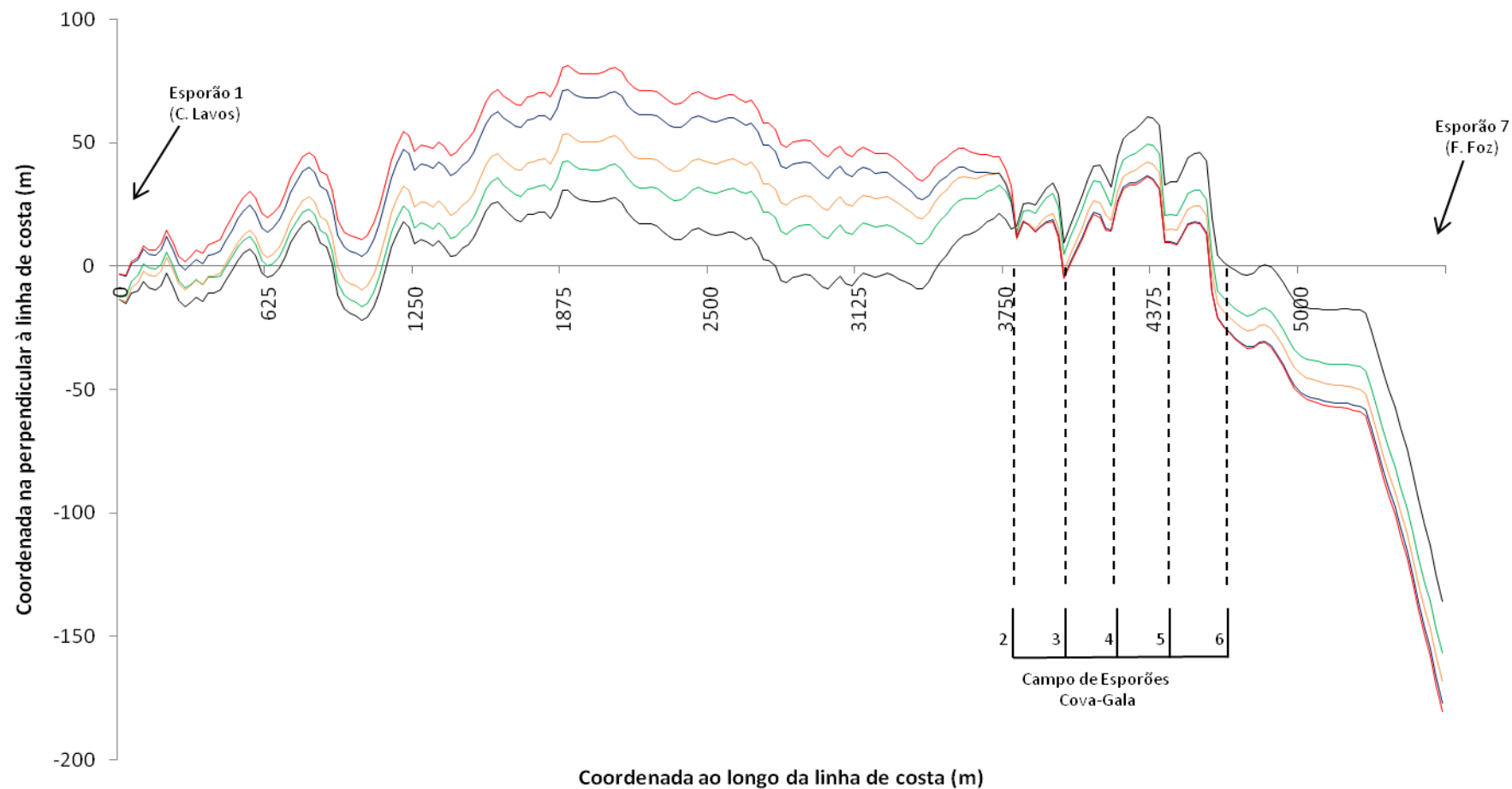
— Variação da LC após 2 anos — Variação da LC após 4 anos — Variação da LC após 6 anos  
 — Variação da LC após 12 anos — Variação da LC após 20 anos



## Posições da Linha de Costa para o Cenário F

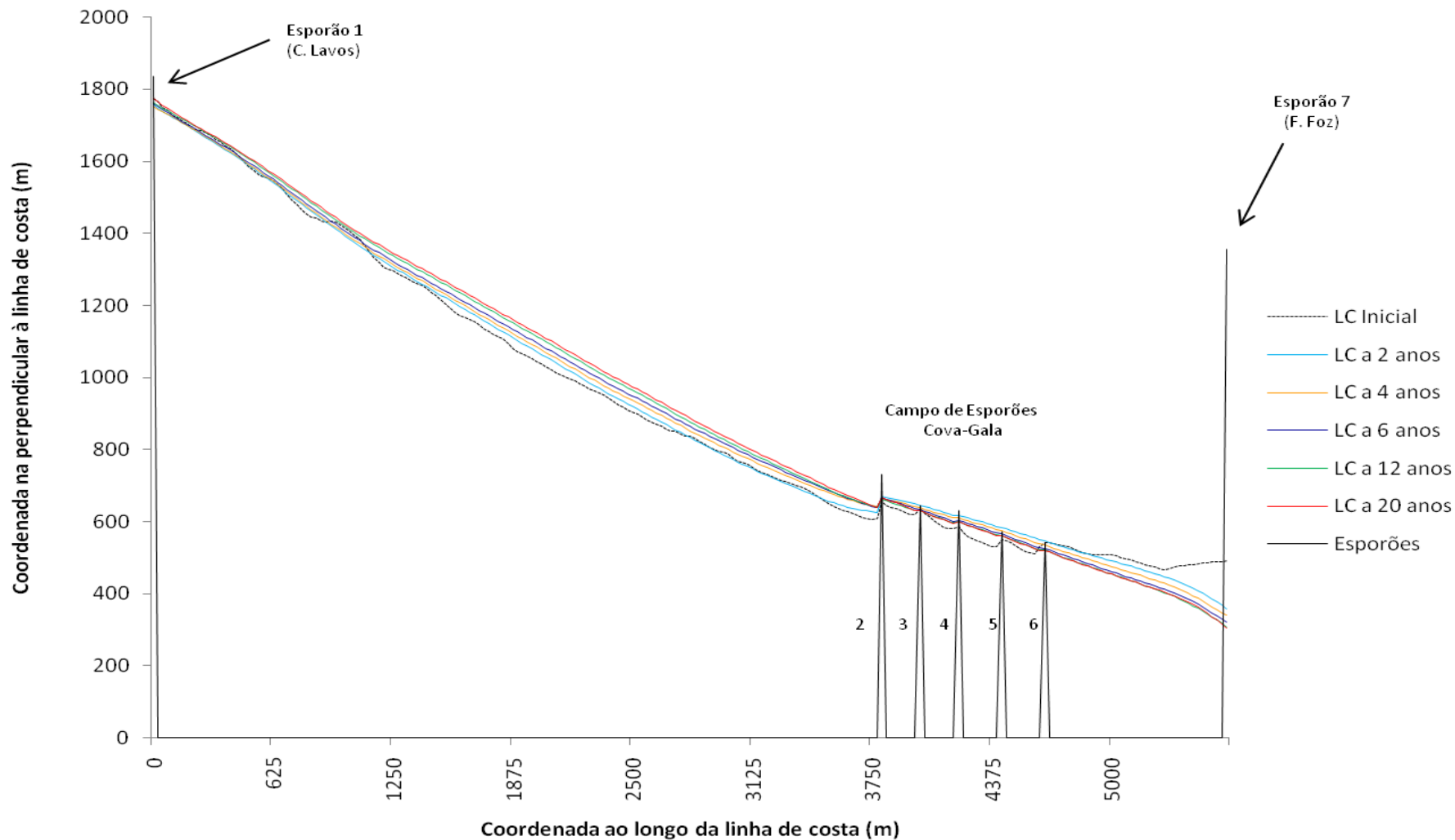


## Avanços e recuos da Linha de Costa para o Cenário F

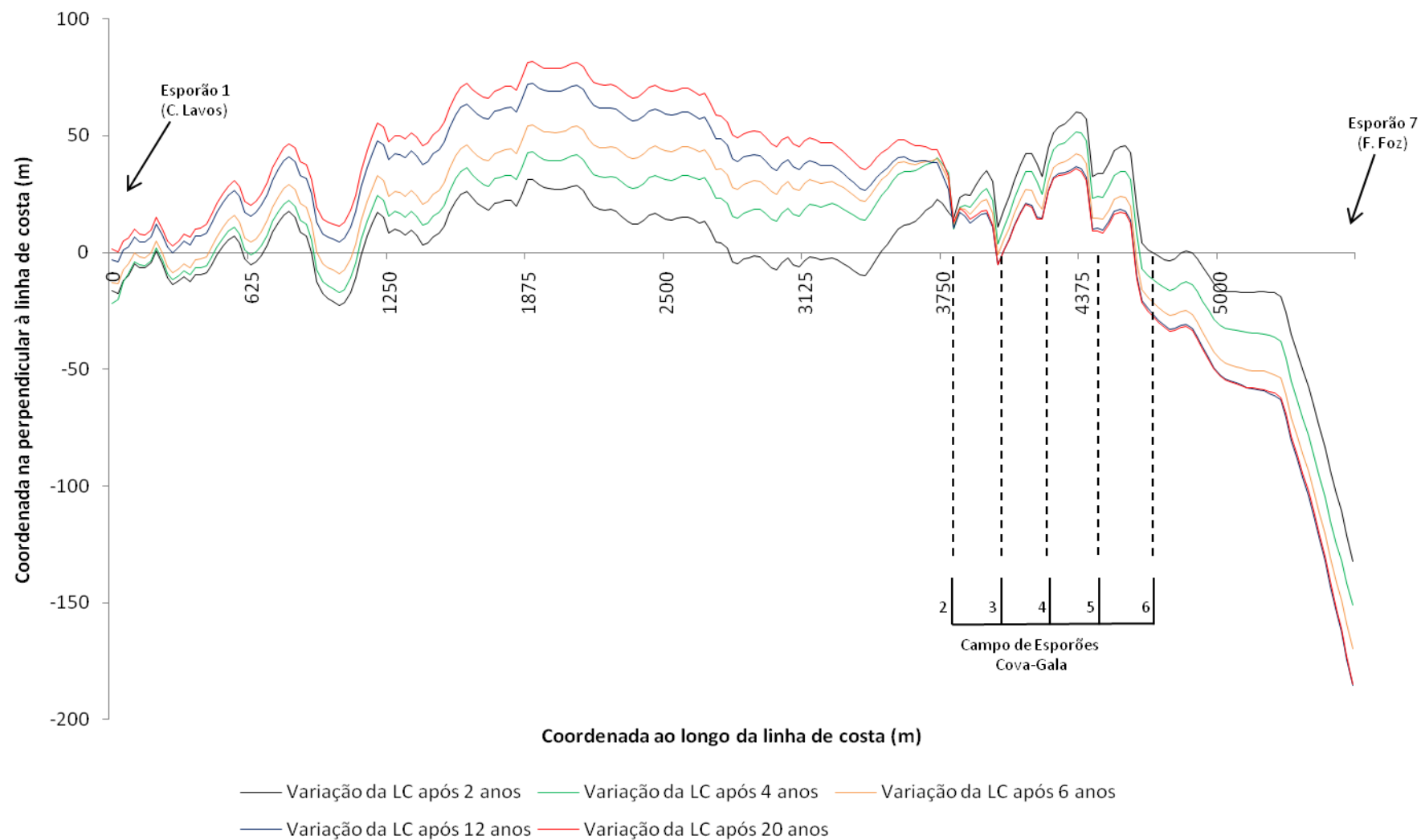


— Variação da LC após 2 anos — Variação da LC após 4 anos — Variação da LC após 6 anos  
 — Variação da LC após 12 anos — Variação da LC após 20 anos

### Posições da Linha de Costa para o Cenário G



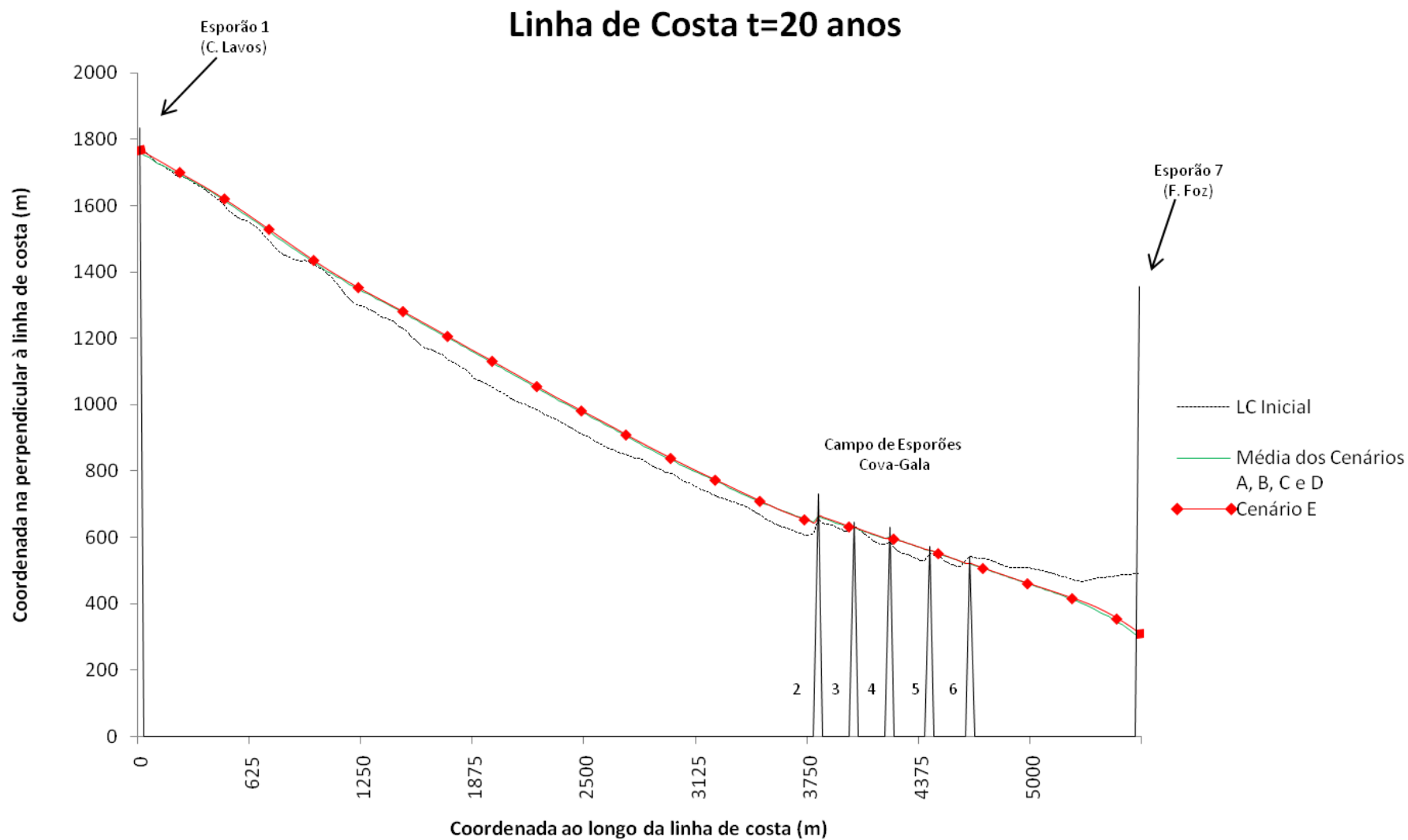
## Avanços e recuos da Linha de Costa para o Cenário G



## **Anexo I**

Resultados do modelo GENESIS onde é comparada a média dos cenários A, B, C e D e a linha do cenário E para t=20anos





## Avanços e recuos da Linha de Costa t=20 anos (m)

