

**BRICLOG**

**ESTUDOS HIDRODINÂMICO E DE SEDIMENTAÇÃO  
CONSULTORIA**

**RT-1157-GR-HIC-GER-01-R1**

**RELATÓRIO TÉCNICO  
ESTUDOS HIDRODINAMICOS E SEDIMENTOLÓGICOS**

REV.	DATA	EXEC.	APROV.	ASSUNTO
01	01/08/2011	GC	RAP	EMISSÃO INICIAL

## Sumário

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>3</b>
<b>1.</b>	<b>ESCOLHA DE CENÁRIOS.....</b>	<b>4</b>
<b>2.</b>	<b>HIDRODINÂMICA .....</b>	<b>6</b>
2.1.	MONTAGEM DO MODELO .....	6
2.2.	RESULTADOS .....	8
<b>3.</b>	<b>TRANSPORTE DE SEDIMENTO .....</b>	<b>16</b>
3.1.	MONTAGEM DO MODELO .....	16
3.2.	DESCRIÇÃO DO MODELO .....	17
3.3.	RESULTADOS .....	18
<b>4.</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>21</b>
<b>5.</b>	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>22</b>
<b>6.</b>	<b>ANEXO .....</b>	<b>23</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O presente relatório inclui o estudo do impacto no campo de corrente e de sedimentação em suspensão na área, levando-se em consideração a construção do novo cais da Bricloc, no Canal do Cunha, na Baía de Guanabara, bem como da dragagem de seus berços.

Na Figura abaixo se pode observar a área em questão. Na área delimitada na cor preenchida de cinza, pretende-se dragar a uma profundidade de 8 metros. As linhas azuis indicam o canal existente na área que está sendo dragado para uma profundidade de 7m.

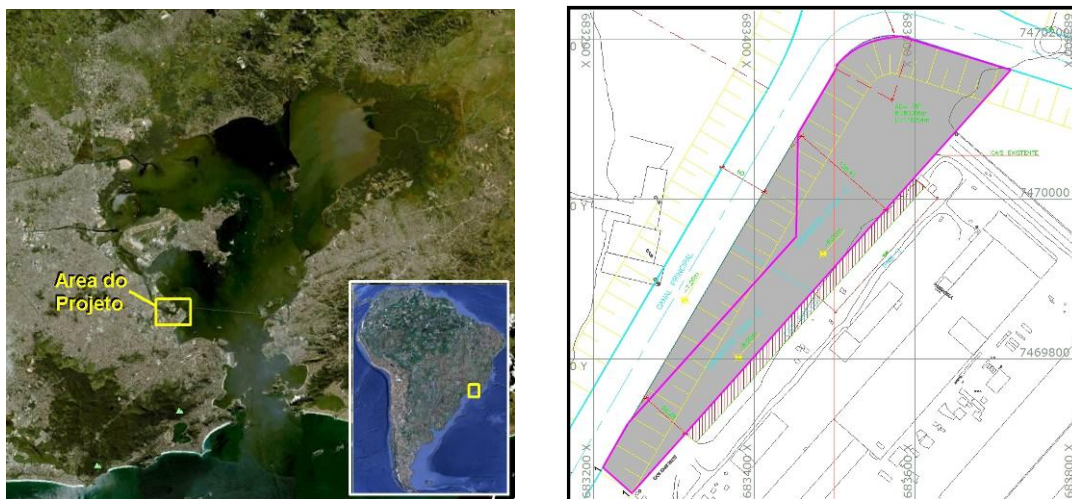


Figura 1.1: Localização da área de estudo e detalhe da área a ser dragada em frente do Terminal da Bricloc

Em geral, o aprofundamento de um canal muda as condições hidráulicas num sistema tipo Baía de Guanabara. A resposta pode ser um aumento nas velocidades das correntes. Velocidades mais altas podem induzir mais erosão e advecção dos sedimentos em suspensão.

A resposta do sistema estuarino às mudanças foi analisada através da aplicação de modelos numéricos avançados. O modelo é aplicado do seguinte modo: Primeiramente as condições existentes são simuladas. Em seguida, o futuro arranjo do plano de dragagem é introduzido no modelo. Com base das simulações numéricas as mudanças relativas à situação atual foram quantificadas.

O objetivo principal do estudo é determinar o impacto da dragagem planejada para aprofundar a área em frente ao terminal até uma profundidade de 8m, e dessa maneira permitir a entrada de navios com maior calado.

## 1. ESCOLHA DE CENÁRIOS

Para identificar os cenários pertinentes para as simulações de avaliação é necessário considerar as condições hidrodinâmicas na área do projeto. Os fluxos na Baía de Guanabara são governados principalmente pelas marés astronômica e meteorológica, esta, proveniente de passagem de frentes fria, associadas à incidência de ventos do quadrante Sul. Este evento da passagem de uma frente é importante, pois ele induzirá um período mais longo de fluxo entrando e saindo da baía, em acréscimo aos fluxos relativos à maré astronômica.

Outro parâmetro como, por exemplo, a descarga fluvial não é dominante para a área. Para cobrir as situações típicas de verão e inverno decidiu-se usar dois períodos de marés, um sobreposto com uma grande entrada de frente (inverno) e um com uma pequena entrada de frente (verão).

Os cenários foram selecionados com base em níveis d'água medidos na Baía de Guanabara (Estação maregráfica Píer Mauá). A Figura 2.1 mostra o nível d'água medido (linha preta), nível de maré astronômica (linha azul). O Período em que foram realizadas as medições foi de Julho 2001 até dezembro 2001. A diferença entre o nível medido e a maré astronômica tem origem na passagem das frentes frias. Este fenômeno meteorológico normalmente acontece com mais frequências no inverno. Para determinar as elevações do nível d'água causada pelas frentes frias foi feita uma filtragem tipo FFT (Fast Fourier Transform). O resultado está indicado com a linha vermelha na figura em baixo. O análise mostrou que as maiores elevações aconteçam em julho e o período mais calma foi dezembro. O período selecionado para representar as condições durante o inverno foi de 15 a 31 de Julho 2001. Neste período a elevação do nível d'água gerada pela frente fria foi aproximadamente 0.4m. O período selecionado de verão foi de 01 a 15 de Dezembro 2001. Neste período a maré meteorológica era relativamente fraca. Figuras 2.2 e 2.3 mostram as variações no nível d'água nos períodos selecionados.

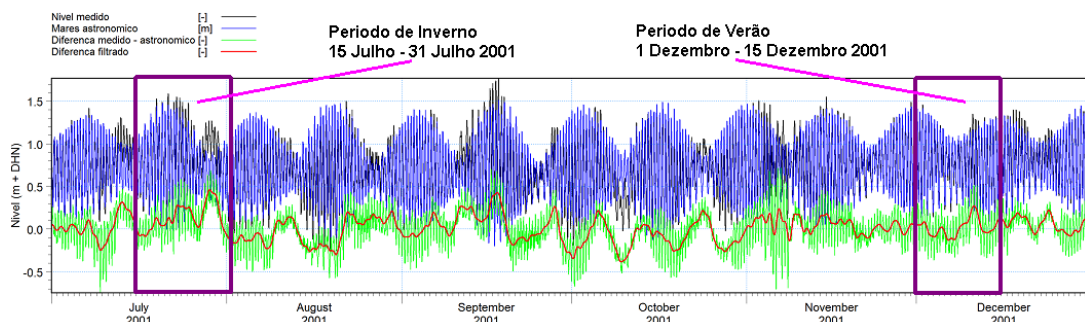


Figura 2.1: Nível de água medidos (linha preta), maré astronômica (linha azul). A maré meteorológica (linha vermelha) foi estimada da diferença (linha verde) entre o nível d'água media e a mares astronômica

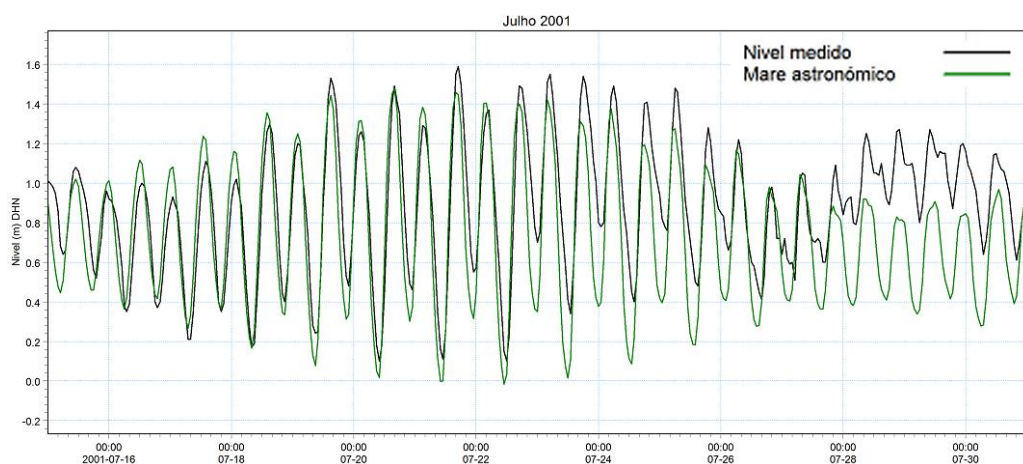


Figura 2.2: Nível d'água medido e previsto (mares astronômica) no período de 15 ate 31 de Julho 2001

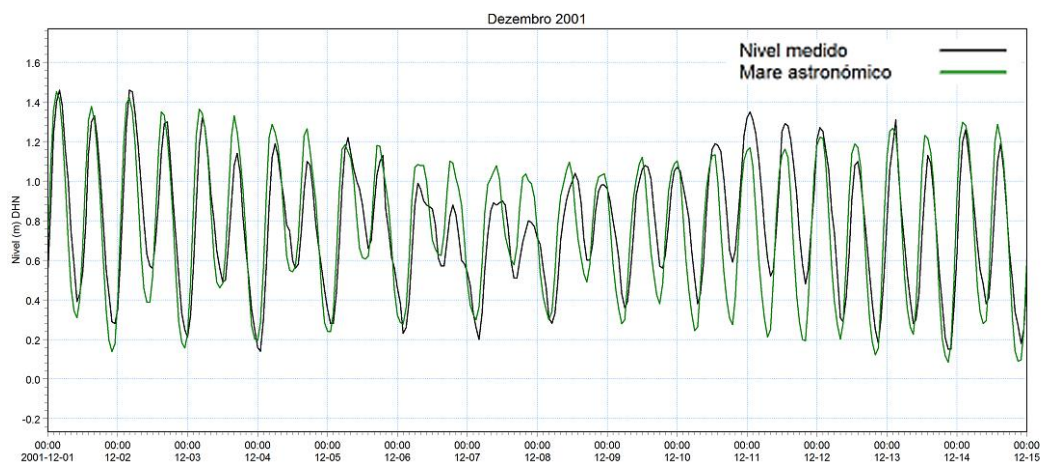


Figura 2.3: Nível d'água medido e previsto (mares astronômica) no período de 1 ate 15 de Dezembro 2001.

## 2. HIDRODINÂMICA

Para simular os níveis d'água e as velocidades das correntes na área do projeto, gerados pelas marés, propõe-se o emprego de um modelo bidimensional integrado na vertical.

A modelagem hidrodinâmica foi feita com o MIKE 21 HD, um dos mais avançados sistemas computacionais da atualidade para a modelagem a duas dimensões (2D) de escoamentos de superfície livre, em corpos d'água onde a estratificação do meio possa ser negligenciada. O modelo pode simular o escoamento em áreas que por vezes ficam alagadas e por vezes secas. Uma descrição técnica mais detalhada deste modelo esta apresentada em Anexo.

O modelo hidrodinâmico foi empregado na obtenção dos campos de correntes relativos aos vários cenários de interesse, inclusive a dragagem em frente do novo terminal da Briclog.

### 2.1. Montagem do modelo

O modelo hidrodinâmico cobre uma área de aproximadamente 20 km por 40 km. O domínio espacial do modelo numérico e os contornos batimétricos podem ser vistos nas Figuras 3.1 e 3.2. A batimetria do modelo foi gerada com base em Cartas Náuticas e levantamentos batimétricos disponíveis (Para a área do projeto e adjacências, foi realizada uma batimetria na escala de 1:2000 em junho/11). Os contornos em terra foram obtidos de fotos aéreas.

A figura abaixo apresenta um exemplo da malha batimétrica em elementos finitos para o domínio de estudo (direita) e uma visualização local da região ao Norte do porto.



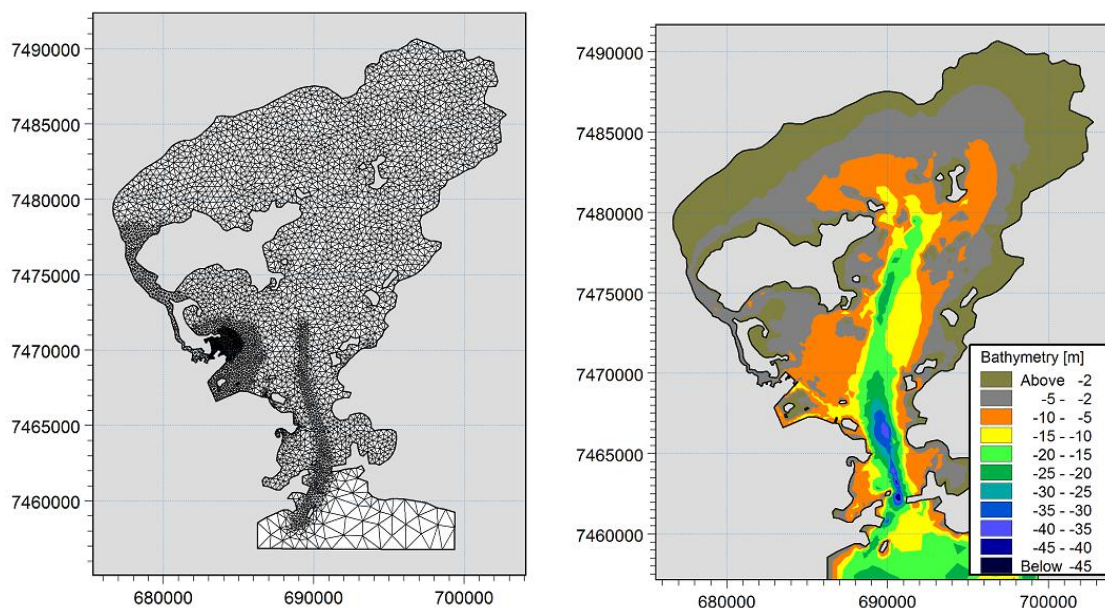


Figura 3.1: Esquerda: malha computacional, direita: batimetria.

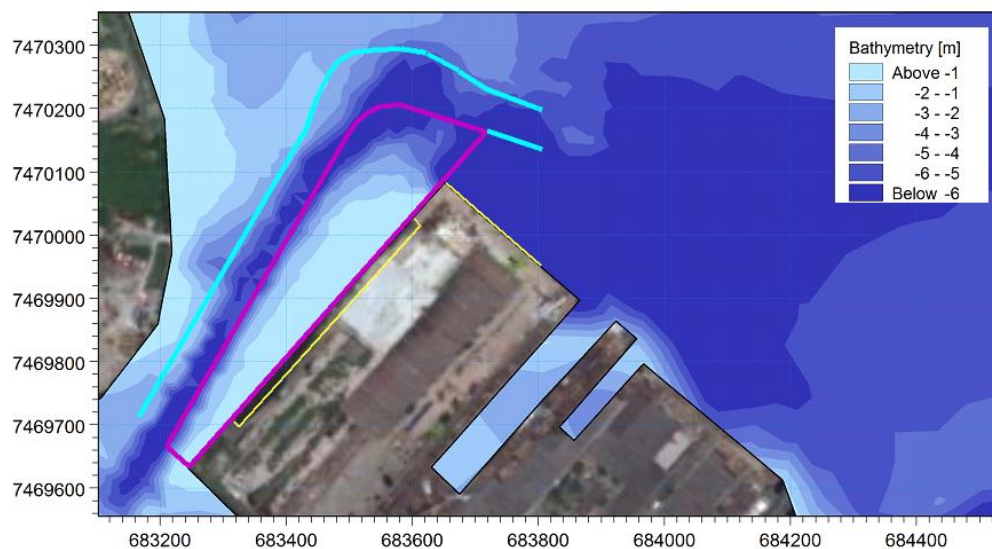


Figura 3.2: Batimetria na área do projeto

Foi aplicado um modelo em *malha flexível*. A malha flexível oferece a possibilidade de ser usada uma resolução mais fina nas áreas críticas, onde são necessários resultados detalhados. Em áreas mais afastadas é escolhida uma resolução mais grosseira, para diminuir o esforço computacional.

A rugosidade de fundo, definida pelo Coeficiente de Manning, foi tomada como  $M = 42$ . A viscosidade turbulenta foi calculada da formulação de Smagorinsky usando um fator de viscosidade turbulenta de 0.28.

Na condição de contorno aberta do modelo, situada ao largo, foram impostos os níveis de água medidos pelo INPH. A resolução no tempo é de 1 hora.

Nenhuma informação espacial detalhada sobre o vento foi disponibilizada. Porém, a medição pontual indica que as velocidades do vento durante o período simulado foram pequenas (i.e.  $<5$  m/s) e não significantes para a hidrodinâmica durante o período. Os ventos, portanto, não foram incluídos nas simulações.

## 2.2. Resultados

Os cenários de verão e inverno como definidos na seção 2 foram simulados no modelo de hidrodinâmica.

As figuras 3.5 (a, b, c, d, e) mostram o campo de corrente simulado pelo modelo, para a situação atual, durante um ciclo de maré, em cinco estágios (1, 2, 3, 4, 5). A variação do nível d'água em Julho e o período escolhido para apresentação dos resultados estão apresentados nas figuras 3.3 e 3.4.

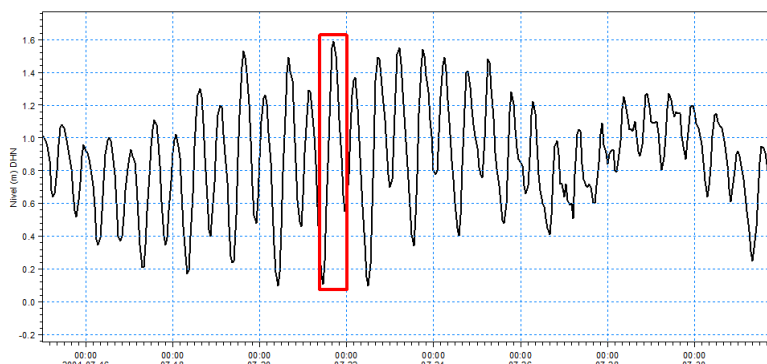


Figura 3.3: Níveis d'água medidos em Julho 2001



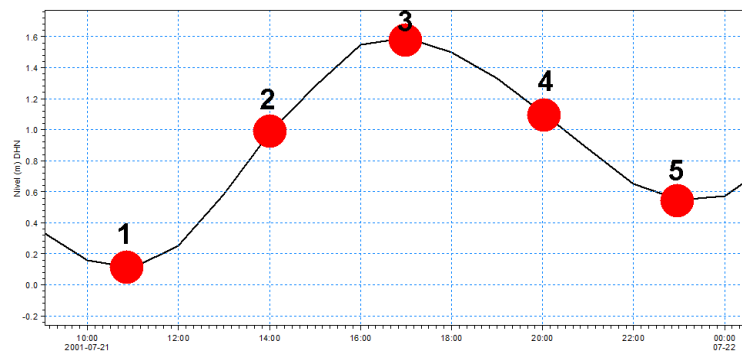


Figura 3.4: Variação do nível d'água na maré de sizígia 21 Julho 2001. As marcas em vermelho indicam 5 estágios durante o período de mares (1:maré baixa, 2:maré enchente, 3: maré alta, 4, maré vazante, 5: maré baixa).



Figura 3.5a Campo de corrente simulado na maré baixa – Situação atual.

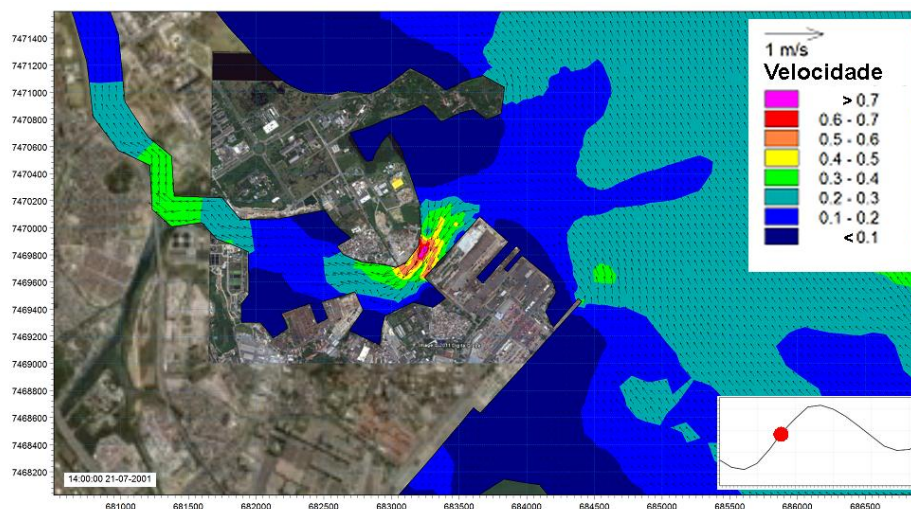


Figura 3.5b: Campo de corrente simulado na maré enchente – Situação atual.



Figure 3.5c: Campo de corrente simulado na maré alta – Situação atual.

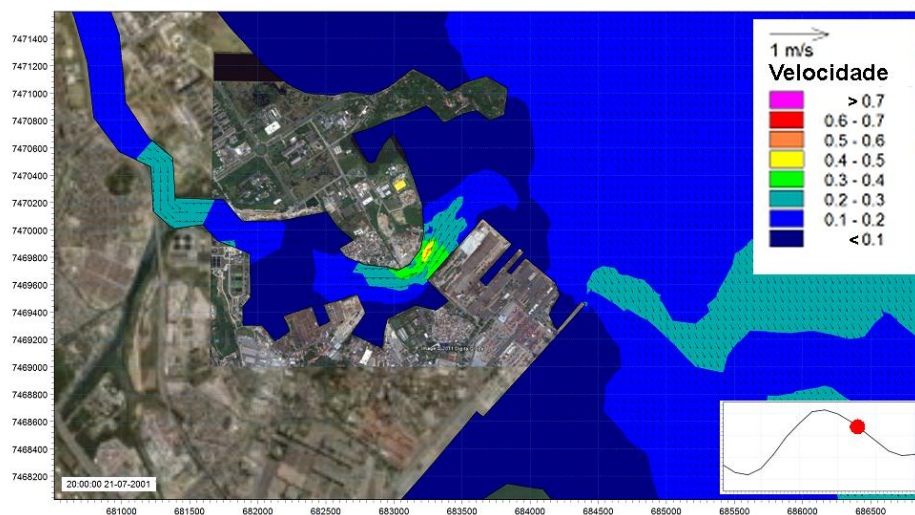


Figure 3.5d: Campo de corrente simulado na maré vazante – Situação atual.



Figura 3.5e: Campo de corrente simulado na maré baixa – Situação atual.

As simulações indicam que as velocidades chegam a um valor máximo de cerca 0.6m/s no canal. Durante maré enchente a direção da vazão é SW. Durante maré vazante a direção é NE.

Os campos de corrente para a situação depois das obras em frente ao novo terminal da Briclog estão apresentados em Figura 3.6 (a, b, c, d, e). Os resultados do modelo mostram as velocidades no canal e na área da Briclog para os mesmos 5 estágios.

As simulações mostram que o impacto das obras em frente do terminal é muito pequeno e de escala local. Na área dragada em frente do terminal as velocidades caem por causa da profundidade maior após a dragagem. Fora da área do terminal não há impacto.



Figura 3.6a Campo de corrente simulado na maré baixa – Situação depois da dragagem.



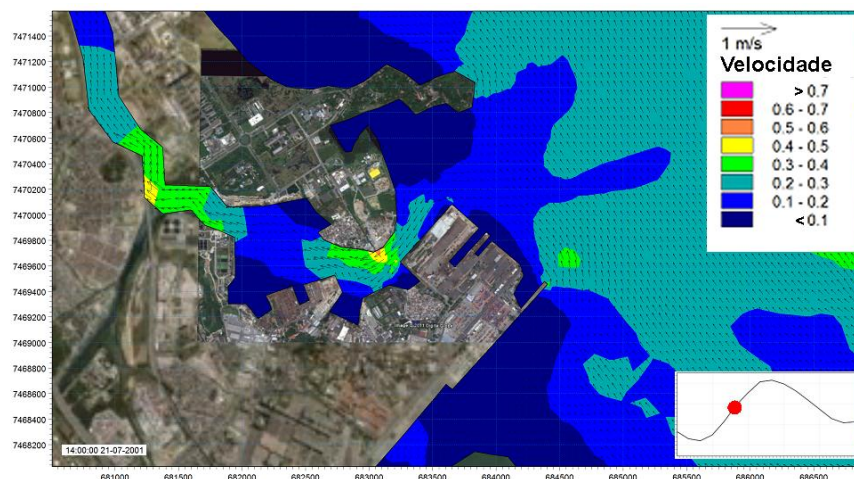


Figura 3.6b: Campo de corrente simulado na maré enchente – Situação depois da dragagem.



Figure 3.6c: Campo de corrente simulado na maré alta – Situação depois da dragagem.



Figure 3.6d: Campo de corrente simulado na maré vazante – Situação depois da dragagem.



Figura 3.6e: Campo de corrente simulado na maré baixa – Situação depois da dragagem.

As velocidades foram tiradas dos resultados do modelo em seis posições (três no canal e três em frente novo cais) apresentada na figura 3.7.

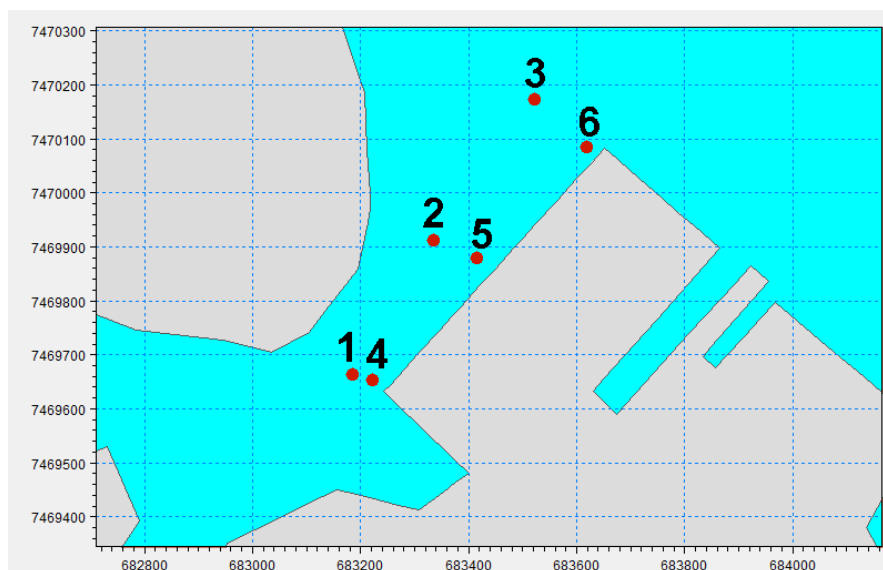


Figura 3.7: Posições selecionadas.

Os resultados mostram uma diminuição nas velocidades no canal e na área dragada em frente ao terminal em termos de 0 até 5 cm/s (Figura 3.8). Esta redução pouco significativa é o resultado do aprofundamento dos berços do novo cais.



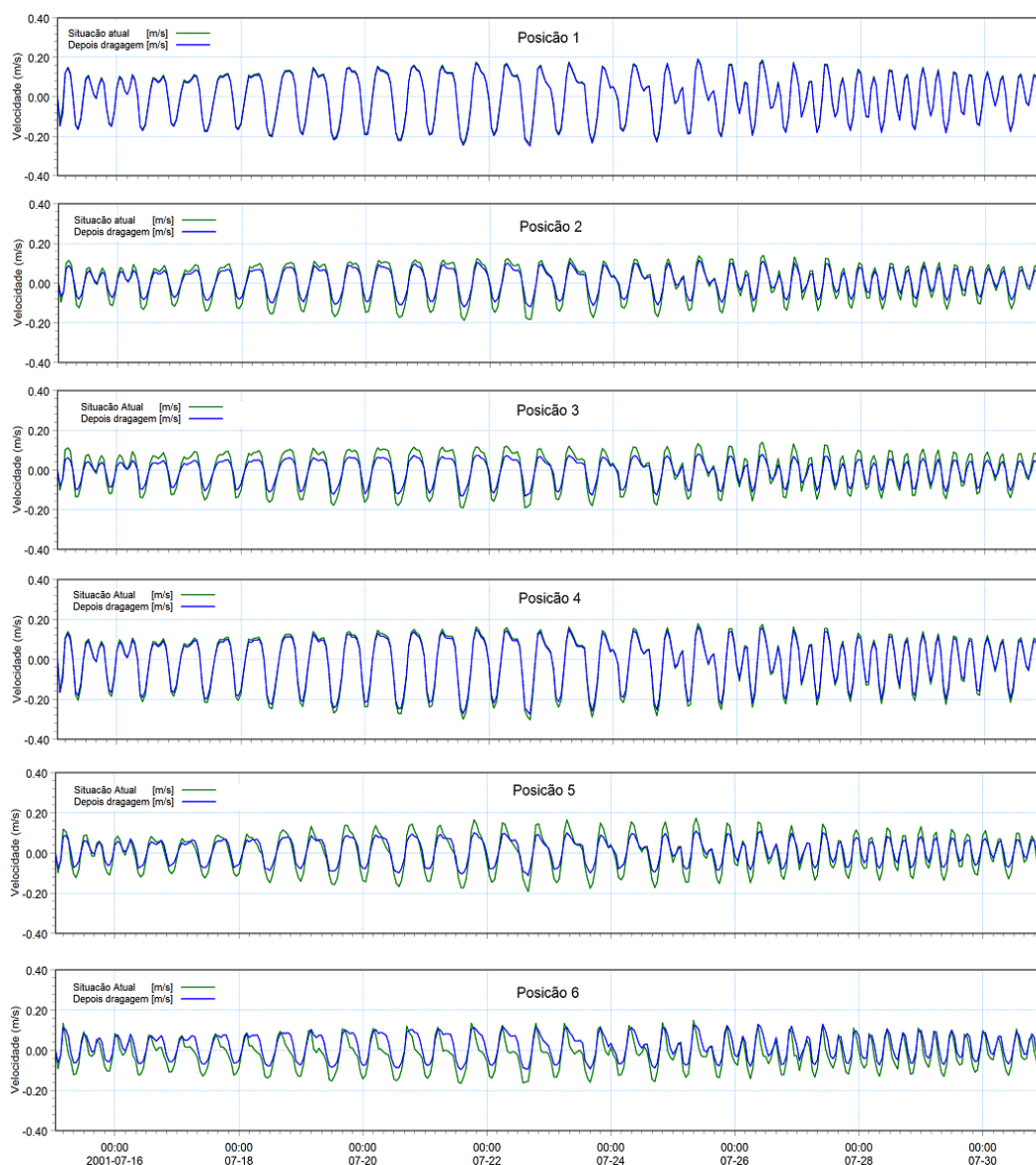


Figura 3.8: Velocidade simulada em seis posições durante um ciclo de mares para a situação atual e depois da dragagem

Analisando as figuras 3.5b, 3.5d, 3.6b e 3.6d que apresenta os campos de correntes em meia maré de enchente (b) e meia maré de vazante (d) para as condições de antes e após as obras, podemos verificar que nas adjacências da área em estudo, mais ao largo, os campos de correntes permanecem praticamente inalterados. Isto significa que o tempo de retenção de água na Baía de Guanabara não será alterado em nada. No Canal do Cunha, teremos provavelmente uma maior renovação da circulação de água devido as intervenções a serem realizadas na área do projeto da Briclog.

### 3. TRANSPORTE DE SEDIMENTO

Os resultados obtidos no modelo hidrodinâmico foram usados para calcular as condições de transporte de sedimentos na área do projeto. As simulações foram feitas com o modelo de transporte de sedimentos do DHI MIKE 21 MT. Com base nas simulações do transporte de sedimentos, será avaliada a sedimentação na área em frente do terminal.

#### 3.1. Montagem do modelo

Se as forças hidrodinâmicas nas partículas de sedimento no fundo marinho ultrapassam um certo valor crítico, as partículas de sedimento serão transportadas. O transporte de sedimento ocorre de duas maneiras: transporte de fundo e em suspensão. O transporte de fundo refere-se ao transporte por arraste no fundo marinho, onde as partículas de sedimento se movem em contato constante com o fundo. O transporte em suspensão é o transporte de partículas de sedimento suspensas na coluna d'água pelas forças turbulentas. Na Baía de Guanabara o transporte de material não coesivo (areia) será transportado no fundo marinho, enquanto que o material fino (lama) é transportado em suspensão.

O transporte de fundo é determinado pelas velocidades de fluxo próximas ao fundo. As taxas de transporte de fundo reagem quase que instantaneamente a mudanças do fluxo d'água (p. ex, tensão de fundo). Para o presente estudo, espera-se que o transporte de fundo seja um mecanismo importante nos canais, onde as velocidades de fluxo são altas.

O transporte em suspensão é determinado pelo nível de turbulência e a velocidade de decaimento do sedimento. A capacidade de transporte do fluxo diminui com o nível de turbulência. Quando o fluxo desacelera, e os níveis de turbulência diminuem, o material em suspensão tende a se depositar no fundo marinho. Mudanças nas condições de fluxo não são refletidas concomitantemente nas concentrações de material em suspensão, uma vez que deve haver algum tempo para as concentrações na coluna d'água se adaptarem as novas condições de fluxo. Esse efeito se reflete nas áreas onde o fluxo desacelera. No presente estudo não se espera que o material em suspensão se deposite nos canais, uma vez que o nível de turbulência é alto. No entanto, a área dragada em frente do terminal pode atuar como região de deposição de sedimento. Essa área está localizada próxima ao canal, onde as concentrações de sedimento em suspensão são altas. Na área do terminal, onde o fluxo é mais calmo, o material em suspensão pode se acumular no fundo marinho.

Para o presente estudo pouca informação foi disponibilizada sobre as características de sedimento. Fotografias aéreas indicaram que o material fino (silte e argila) está presente na área. Presença de areia também foi relatada. Em algumas regiões o fundo marinho constitui rochas ou lama consolidada, não disponível para transporte. Devido à falta de informação detalhada sobre as características sedimentares da região, o presente estudo deve ser utilizado somente como uma análise qualitativa e indicativa. Para avaliar a sedimentação na área do terminal, com maior precisão, são necessárias informações detalhadas do fundo marinho e dos sedimentos da região.

Os mecanismos de transporte e acumulação de sedimento não coesivo (areia, silte) são fundamentalmente diferentes dos mecanismos para a deposição de sedimentos coesivos (lama e argila). Como o projeto está localizado numa área muito calma, o transporte de areia pode ser considerado desprezível. Neste relatório foi avaliado só o mecanismo de transporte de sedimento coesivo.

Para o transporte de sedimento coesivo, a questão chave é determinar o volume de material fino que será depositado nas regiões calmas com baixos níveis de energia turbulenta. Em cada ciclo de maré, volumes relativamente grandes de material em suspensão são carregados para as áreas específicas dentro da baía. Um modelo numérico avançado foi utilizado para estimar a acumulação desse material na área da expansão do porto.

### **3.2. Descrição do modelo**

Das observações de campo sabe-se que em geral o fluxo na área é bem misturado e só ocasionalmente ocorre uma estratificação fraca. Isto significa que o modelo bidimensional integrado na vertical (2D-H) é suficiente. O modelo de transporte de sedimento aplicado é o modelo MIKE 21 MT (Mud Transport). O modelo simula erosão, transporte, decantação e deposição de sedimento com granulometria fina. Devido à dominância de sedimentos finos na área do projeto os sedimentos com diâmetro mais grosseiros (areia) não foram alvo do estudo. Um esboço dos processos físicos está apresentado na Figura 4-1.

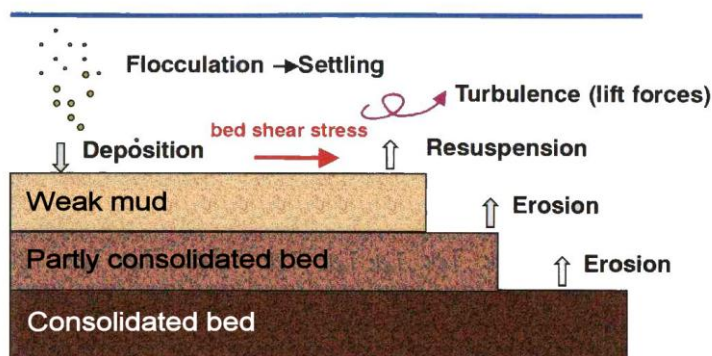


Figura 4-1: Processos físicos incluídos no modelo de transporte de sedimento.

Os fluxos hidrodinâmicos apresentados nas sessões anteriores foram utilizados no modelo de transporte de sedimento. O modelo descreve erosão, transporte e deposição de lama e mistura de lama e areia sobre a ação de correntes e ondas. MIKE 21 MT é aplicável em:

- Frações de lama
- Mistura de areia e lama

Uma descrição técnica mais detalhada do modelo esta apresentada em apêndice.

### 3.3. Resultados

O modelo foi aplicado para calcular a taxa de sedimentação na área em frente do novo terminal. Os dois cenários de verão e inverno como apresentados nas seções anteriores foram simuladas no modelo.

A Figura 4.1 mostra o padrão de sedimentação e erosão na área do projeto antes de dragagem proposta, para os dois períodos simulados. As simulações indicam que existe erosão na parte Oeste do canal e sedimentação na parte Este. Isto acontece porque a seção do canal não esta em equilíbrio com a vazão que passa, tendo em vista que o canal atrás da Ilha do Fundão foi dragado recentemente para uma profundidade de 5m. Com este aprofundamento a resistência do canal ao escoamento diminuiu e por isso a vazão aumentou. A resposta natural é auto-dragagem do canal em frente do terminal.

As simulações mostram que a evolução do leito do mar é mais dinâmica no inverno do que no verão. Isto é por causa da ocorrência de frentes frias mais frequentes no inverno. As frentes causam maiores variações no nível d'água e por isso, maiores prismas de marés. As velocidades mais altas associadas com as frentes causam um transporte de sedimento maior.

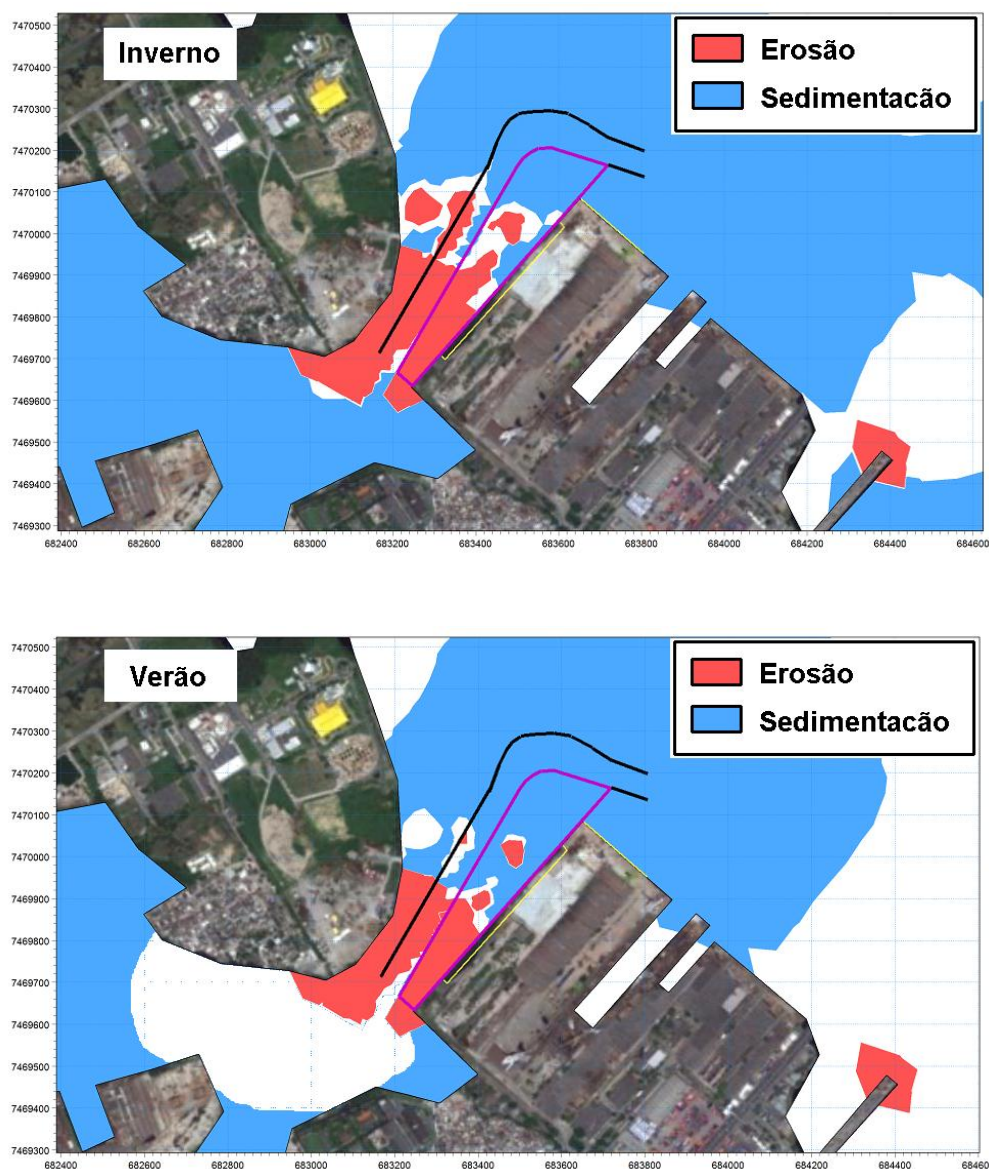


Figura 4.1 - Padrão de erosão e sedimentação para a situação antes de dragagem.

A Figura 4.2 mostra o padrão de erosão sedimentação depois de dragagem para os dois períodos simulados. As simulações indicam que a dragagem da área em frente



do terminal vai propiciar uma pequena sedimentação anual na área do projeto. Isto acontece porque o aprofundamento da área causará uma pequena queda nas velocidades que resulta numa sedimentação maior.

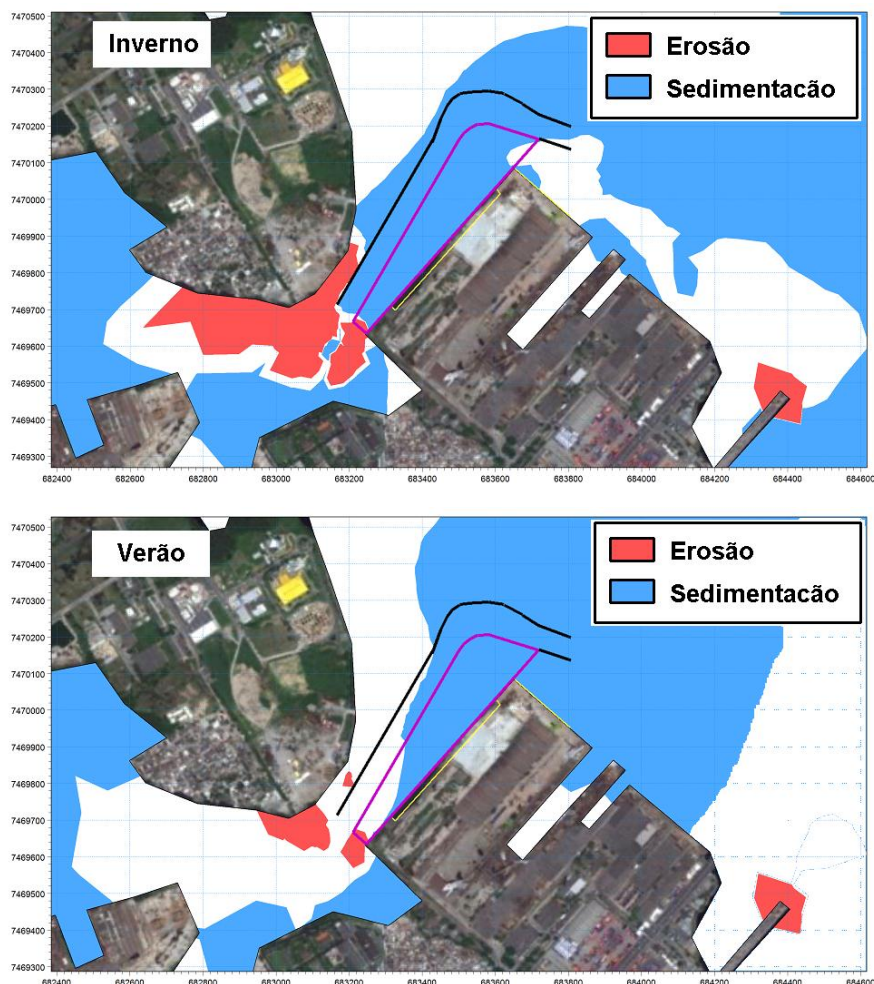


Figura 4.2 - Padrão de erosão e sedimentação para a situação depois de dragagem

As taxas de sedimentação anuais foram estimadas através de extrapolação dos resultados das simulações e estão apresentados na tabela 4.1

Tabela 4.1: Taxas de sedimentação na área do projeto (m/ano). (As posições 1-6 estão apresentadas na figura 3.7.)

Posição	1	2	3	4	5	6
Sedimentação (m/ano)	0.23	0.33	0.25	0.22	0.24	0.22



#### 4. Conclusões

Foi executado um estudo do impacto do aprofundamento da área, em frente ao novo cais da Bricloc a ser construído, na Baía de Guanabara. O estudo teve por objetivo principal fornecer uma avaliação das possíveis mudanças na hidrodinâmica e do transporte de sedimento após a dragagem. O estudo foi realizado levando-se em consideração efeitos de várias condições meteorológicas.

Com um modelo numérico avançado foram simulados dois cenários representativos para as condições de verão e inverno. A duração de cada simulação foi de um ciclo completo de marés de quadratura e sizígia (14 dias).

As seguintes conclusões foram obtidas:

- O aprofundamento da área em frente do novo terminal da Bricloc terá um pequeno efeito nas velocidades localizadas na área do projeto. Fora desta área o impacto da dragagem é desprezível.
- Para a situação atual haverá pequena erosão no canal no lado Oeste da área do projeto. Esta erosão é causada pelo aumento de vazão que é consequência do aprofundamento do canal atrás da Ilha do Fundão.
- Depois da dragagem o padrão de erosão/deposição mudará na área do projeto. Terá sedimentação leve no canal na área em frente do novo terminal. Fora da área do projeto o impacto no padrão de transporte de sedimento é desprezível.
- As simulações indicam que, em geral, a área em frente do terminal vai assorear lentamente com taxas de sedimentação de cerca 25 cm por ano.
- Conclui-se que as intervenções serão salutareis do ponto de vista hidrodinâmico, para o corpo hidráulico analisado.

## 5. REFERÊNCIAS

/1 / Mehta, A.J., Hayter, E.J., Parker, W.R., Krone, R.B. e Tectter, A.M., 1989. Cohesive sediment transport. I: Process description. Journal of Hydraulic Engineering - ASCE 115 (8), 1076-1093.

/2/ DHI. 2010. MIKE 21 HD - Manual do usuário (Software user manual)

/3/ DHI. 2010. MIKE 21 MT - Manual do usuário (Software user manual)

## 6. ANEXO

### ***MIKE 21 HD - Módulo Hidrodinâmico***

O MIKE 21 HD é o módulo computacional básico do Sistema MIKE 21, provendo a base hidrodinâmica para outros módulos do MIKE 21, tais como o módulo de Advecção - Dispersão (AD), o de Qualidade da Água (WQ), o de Advecção de Partículas (PA), o de Metais Pesados (ME), etc.

O modelo simula a variação do nível de água e do escoamento, em relação a uma grande variedade de esforços forçantes atuantes em lagos, estuários, baías e áreas costeiras (marés, ventos, descargas fluviais, tensões de radiação geradas pela propagação das ondas, etc.). Os níveis de água e os fluxos são resolvidos numa malha retangular ou quadrada, cobrindo toda a área de interesse.

O MIKE 21 HD inclui formulações para os efeitos de:

- Termo convectivo e transversal da quantidade de movimento
- Tensão de cisalhamento no fundo
- Tensão de cisalhamento do vento na superfície
- Gradientes da pressão barométrica
- Forças de Coriolis
- Dispersão da quantidade de movimento (inclusive com a formulação de Smagorinsky)
- Correntes induzidas pelas ondas
- Fontes e sumidouros (massa e quantidade de movimento)
- Evaporação e precipitação
- Áreas secas e/ou alagadas

- Estruturas

As condições hidrográficas de contorno podem ser especificadas em cada fronteira aberta do modelo como um nível ou fluxo constante, ou variável no tempo e espaço. Fontes e/ou sumidouros, constantes ou variáveis, podem ser especificados em qualquer lugar dentro do modelo. Um mapa dos níveis iniciais da superfície livre pode ser aplicado no modelo inteiro.

O MIKE 21 HD pode ser aplicado a uma extensa gama de fenômenos hidráulicos. Isto inclui a modelagem da hidráulica da maré, das correntes geradas pelos ventos e pelas ondas, das ondas devidas a terremotos e das ondas de inundação. O Sistema é uma ferramenta indispensável ao engenheiro, auxiliando-o na determinação dos parâmetros de projeto a serem usados nos trabalhos de proteção costeira, assim como em estruturas offshore e em oleodutos assentados no fundo do mar.

O módulo hidrodinâmico do MIKE 21 é um sistema de modelagem numérica geral, para a simulação de escoamentos não permanentes 2D em fluidos verticalmente homogêneos. Por ser um modelo hidráulico geral, ele pode facilmente ser montado para descrever fenômenos hidráulicos específicos. Exemplos de tais aplicações são:

- Troca de água devida às marés e às correntes
- Ondas devidas a terremotos
- Circulações secundárias, redemoinhos e vórtices
- Ressonância em portos
- Ruptura de barragens

As equações de continuidade e de conservação da quantidade de movimento são resolvidas através de técnicas implícitas de diferenças finitas, com as variáveis definidas numa grade espacial retangular alternada. Uma técnica de 'passo fracionado', combinada com um algoritmo ADI (Alternating Direction Implicit), é usada na solução das equações, para evitar a necessidade de iteração.

Uma precisão de segunda ordem é assegurada através da centralização no tempo e no espaço de todas as derivadas e coeficientes. O algoritmo ADI implica em que a cada intervalo de tempo a solução seja feita primeiro nas equações de quantidade de movimento em x, seguidas por uma solução semelhante na direção y.

A aplicação do esquema implícito de diferenças finitas resulta num sistema tri-diagonal de equações para cada linha de grade do modelo. A solução é obtida invertendo-se a matriz tri diagonal, usando-se o algoritmo 'Double Sweep', o qual é uma forma muito rápida e precisa de eliminação de Gauss.

O esquema implícito é usado no MIKE 21 de tal modo que problemas de estabilidade não acontecem, contanto, é claro, que os dados de entrada sejam fisicamente razoáveis, ou seja, o incremento de tempo usado nas computações só está limitado por exigências de precisão (Em geral o MIKE 21 HD pode trabalhar com números de Courant até 5, sem problemas de estabilidade. No entanto, dependendo das características do corpo d'água, esse valor pode chegar até 20).

-----000-----