

ESTUDO DA CONCEPÇÃO DE MODELOS FÍSICOS COSTEIROS BASEADOS EM MODELOS NUMÉRICOS

Antonio Henrique Soares Dutra Gomes Pereira^{1}; Tiago Zenker Gireli²; José Carlos de Melo Bernardino³*

RESUMO

O ambiente costeiro e as obras nele construídas, são muito influenciados por fenômenos físicos como ondas, marés, correntes entre outros. As pesquisas efetuadas com o auxílio de modelos físicos visam aprimorar os estudos relativos à região em escala reduzida, e a interação com um modelo matemático desenvolvido e calibrado com dados de campo, permite que informações destes extraídas sejam representativas e fiéis à situação real que se encontra no protótipo. Através de um aprofundamento na teoria existente e do acompanhamento da construção do modelo físico do Terminal Ponta da Madeira Norte, na Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica (FCTH), o presente trabalho busca identificar todas as etapas do processo de concepção de um modelo físico em que sejam benéficas as interações entre este e o modelo numérico, detalhando-as, visando obter as maiores vantagens de cada um. Assim, é muito importante salientar que estudos de concepção de obras costeiras e portuárias, por seu grande porte e alto custo, devem incluir modelos físicos e matemáticos para que bons resultados sejam obtidos. Estes resultados devem embasar decisões mais acertadas, que procurem minimizar os custos e os impactos socioambientais quando possível, e maximizar a utilização e funcionalidade das obras.

Palavras-chave - modelo físico, modelo numérico, hidráulica marítima.

CONCEPTION OF COASTAL PHYSICAL SCALE MODELS BASED ON NUMERICAL MODELS

ABSTRACT

The coastal environment and the constructions placed there are affected by physical phenomena as wind waves, tide waves, currents and others. Researches supported by physical and numerical models correctly developed and adjusted with fields data, allows the researcher to get many relevant information and results about the prototype. Going deep in theory while following the construction and calibration of the new Ponta da Madeira Port physical model, at the Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica (FCTH), the present paper has the purpose to identify all the steps about the conception of a physical model where the numerical model could help the researcher to take decisions in a way to get the best results of each one. So, due to the high cost and big dimensions of coastal and port structures, it is very important to develop both physical and numerical models to reach good results when designing them. These results should direct to better decisions in order to minimize the cost and the social and environment impacts when it is possible, and maximize the uses and functionality of the constructions.

Key-words: physical model, numerical model, maritime hydraulics.

1) Aluno de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas, Brasil. E-mail: ahdutra@gmail.com

2) Professor Doutor da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas, Brasil. Email: zenker@fec.unicamp.br

3) Professor da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo e Coordenador da Área de Modelação Hidráulica da Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica – FCTH, Brasil. E-mail: bernardino@fcth.br

INTRODUÇÃO

Segundo Alfredini (2009), diversos fenômenos atuam simultaneamente sobre uma região costeira, afetando-a diretamente, provocando mudanças que ocorrem ao longo do tempo. Quando se pretende estudar este ambiente, influenciado por ondas, marés, correntes e ventos, nota-se que se trata de uma tarefa particularmente complexa, pois ocorre numa interface tripla, entre continente, oceano e atmosfera. Nesta interface se encontram as obras portuárias e costeiras, cuja importância vem aumentando e colaborando cada vez mais para o desenvolvimento da economia e do turismo no país. Os estudos realizados visam soluções que menos afetem o equilíbrio dinâmico da região.

Estas obras, em sua maioria de grande porte, e por consequência alto custo, devem ser devidamente estudadas e sua viabilidade de execução analisada. Dessa maneira evitam-se quaisquer falhas nos projetos que possam ocasionar desde a perda dos investimentos com a obra e altos custos de manutenção, até o gasto de quantias elevadas na reparação às mudanças no equilíbrio ambiental local (GIRELI, 2008).

A precariedade na fase de estudo aliada a erros de projeto, ressalta Gireli (2008), ocasionaram, por exemplo, em consequência da construção de um enrocamento de abrigo para proteger o Porto de Mucuripe das ondas, impactos no equilíbrio dinâmico local. Com a construção do abrigo, o transporte de sedimentos ao longo da costa foi interrompido, o que causou uma erosão nas praias localizadas a oeste do porto e acúmulo de sedimentos na face da estrutura de abrigo. Simultaneamente, com a diminuição das correntes atrás do enrocamento, surgiram condições adequadas para que o sedimento fino se depositasse, diminuindo a profundidade próxima ao porto, dificultando a atracação de navios maiores.

Gireli (2008) cita outro exemplo, o Porto de Suape em Pernambuco, onde a remoção de um trecho dos arrecifes para a passagem das embarcações permitiu que parte da cunha salina (água salgada) antes barrada pela presença dos arrecifes, invadisse o estuário e alterasse significativamente a salinidade do ambiente estuarino. Afetou diretamente a parte do rio próxima ao mar (estuário), alcançando também as tomadas d'água das indústrias exigindo o deslocamento destas para montante.

Situações assim evidenciam que projetar estruturas costeiras somente baseando-se em conhecimentos teóricos é insuficiente para garantir a otimização dos custos e a minimização dos impactos causados por obras deste porte. Neste sentido, para tentar prever e evitar os problemas citados anteriormente são utilizadas ferramentas conhecidas como modelos físicos, onde, em escala reduzida, procura-se recriar condições o mais representativas possível das encontradas no real (protótipo) e onde são ensaiados os projetos de obras marítimas, visando otimizar suas concepções e avaliar os possíveis impactos causados à região na qual serão implantadas.

Outra ferramenta empregada com o mesmo intuito é a modelação numérica (softwares específicos), extremamente vantajosa nos estudos onde se necessita simular grandes áreas, buscando uma reprodução razoável dos fenômenos envolvidos, o que seria proibitivo para a modelagem física em função das dimensões dos modelos que seriam necessários para que a escala fosse adequada. Entretanto, é importante salientar que mesmo com o avanço dos métodos numéricos e da capacidade de processamento dos computadores, esta modelação ainda está longe de substituir os modelos físicos devido à complexidade dos fenômenos físicos e à sinergia entre eles, o que ainda não consegue ser reproduzido pelos modelos existentes. A reprodução em detalhes dos efeitos da introdução de estruturas costeiras e portuárias, a execução de ensaios de amarração de

navios e manobras de atracação e desatracação também são obtidos de maneira mais fiel com o emprego da modelação física.

A tendência observada na década de 70 por Pimenta (1971), em eventos internacionais que reuniram membros dos mais renomados laboratórios de hidráulica do mundo, foi a de empregar ambas as ferramentas (modelos físicos e numéricos) de forma que um “realmente” o outro, a fim de obter as maiores vantagens proporcionadas por cada um. Esta tendência se tornou padrão e é observada até os dias de hoje nos estudos em hidráulica.

Assim, tem sido empregado de forma cada vez mais frequente o uso de modelos numéricos no auxílio da definição, para o modelo físico, dos principais parâmetros envolvidos, como por exemplo: a área a modelar, os fenômenos físicos que devem ser simulados, vazões, velocidades entre outros.

OBJETIVO

O intuito deste trabalho é destacar os pontos específicos da concepção do modelo físico em que é necessária, ou muito útil, a utilização do modelo numérico, isto é, apontar exatamente quais etapas envolvem decisões que requerem auxílio deste recurso.

METODOLOGIA

A metodologia consiste em buscar, a partir de bibliografias internacionais e nacionais existentes sobre o assunto e da experiência do corpo técnico da Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica - FCTH, do Laboratório de Hidráulica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo e do Laboratório de Hidráulica da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas, identificar todas as variáveis envolvidas na concepção de um modelo físico costeiro onde a modelagem matemática tem papel relevante para a melhoria deste processo.

Para tanto, foi empregado como estudo de caso a concepção do modelo físico do trecho norte do Terminal Portuário de Ponta da Madeira (TPM-Norte) da Companhia Vale do Rio Doce – Vale, que se encontra em processo de calibração e validação no grande Hall de Modelos do Laboratório de Hidráulica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, viabilizado a partir de um contrato entre a Vale e a FCTH.

A escolha deste modelo se deveu à existência de um modelo numérico da região calibrado e validado a partir de uma longa série de dados de campo (mais de 30 anos), que vem sendo utilizado para auxiliar na concepção do novo modelo do entorno do terminal da Vale em São Luis do Maranhão.

CONCEPÇÃO DOS MODELOS NUMÉRICO E FÍSICO

Na concepção dos modelos físicos baseados em modelos numéricos, processo compreendido desde estudos preliminares até a exploração propriamente dita, várias etapas se sucedem cada qual com suas peculiaridades, sendo necessária certa experiência para que se efetue de maneira correta o desenvolvimento, calibração e validação do modelo numérico, e a execução da infraestrutura, instrumentação e os posteriores ensaios, aquisições e interpretações de dados do modelo físico. As etapas preliminares à concepção dos modelos são:

- Definição do local a ser estudado: a partir de um projeto básico, desenvolve-se um plano de estudos na região de interesse para coleta dos dados que nortearão a concepção dos modelos;

- Escolha dos dados para levantamento em campo: diferentes situações podem ser estudadas, cada qual com suas peculiaridades como: diferentes correntes, ondas, topo-batimetria, ventos, etc e para cada uma delas deve-se determinar os pontos onde coletar os dados de maneira a facilitar futuras extrapolações e calibração do modelo numérico;

Modelo Numérico

Após as etapas preliminares de coleta e compilação de dados de campo inicia-se o processo de desenvolvimento do modelo numérico, baseado nesses dados. As etapas envolvidas são:

- Reprodução digital da topobatimetria local com auxílio de software: geração de superfície digital em três dimensões do relevo da região, de acordo com os dados coletados em campo nos levantamentos topobatimétricos, para que se possa em seguida calibrar o modelo numérico mais facilmente. Estes dados são utilizados posteriormente na construção da superfície topobatimétrica do modelo físico;

- Desenvolvimento, calibração e validação do modelo numérico: a partir dos dados de campo, reproduz-se o escoamento no relevo digitalizado (através de equacionamentos conhecidos na área de hidrodinâmica desenvolvidos por Cabelka e Novak (1981)), comparando-se os resultados das simulações com os dados de campo utilizados na calibração. Os modelos numéricos podem ser de uma, duas ou três dimensões, e cada caso exige um tipo de tratamento, cada vez mais complexos. Considera-se validado o modelo assim que se reproduzem situações cujos dados de campo não tenham sido utilizados na calibração e o modelo gere resultados coerentes com o protótipo (outros tipos de validação podem ser feitos, desde que se possa comprovar que o modelo forneça resultados que condizem com a realidade – por exemplo: esforços de amarração de navios, deslocamentos de navios, etc);

Modelo Físico

- Definição das escalas de semelhança: as escalas de semelhança, definidas para pares de pontos homólogos (pontos que tem as mesmas coordenadas tanto no modelo quanto no protótipo, e devem apresentar comportamentos semelhantes em escala), devem ser determinadas a partir da escala geométrica no caso de modelos costeiros. Na semelhança mecânica entre dois escoamentos, define Almeida *et al* (1968), estes devem percorrer trajetórias geometricamente semelhantes, havendo relações entre as velocidades do modelo e do protótipo, assim como entre as acelerações, ambos em pontos homólogos. Isto deve ser feito para todas as grandezas físicas que atuam no escoamento. No estudo dos escoamentos livres, não podemos descartar o peso do fluido e, portanto, as equações utilizadas não podem ser simplificadas. Assim, para que o sistema de equações seja o mesmo para dois escoamentos semelhantes geometricamente, é necessário verificar a igualdade dos números de Froude (Fr), referentes a cada escoamento, e que os números de Reynolds (Rey) sejam superiores à um valor denominado $Rey_{soleira}$.

- Definição da área a ser reproduzida no modelo físico: escolha da microrregião de interesse, procurando alinhar os limites do modelo (paredes) às linhas de corrente (geradas no modelo numérico), para evitar interferências no escoamento em pontos onde se pretende aferir medidas. A escolha da escala sempre se limita à área disponível para construção do modelo, contudo evita-se ao

máximo efeitos de borda que possam comprometer os resultados. A escala é, geralmente, não distorcida (mesma escala nas três dimensões) em modelos costeiros, principalmente quando houver batedores de ondas ou ensaios com embarcações;

- Construção da infraestrutura: após a definição da área a ser modelada e da escala geométrica, inicia-se a construção efetivamente. Compreende-se por infraestrutura: os reservatórios (enterrado e superior), bombas de recalque, tubulações (recalque, alimentação e restituição), reprodução da topobatimetria região, instalação de equipamentos (comportas basculantes e stop-log, módulos tamponáveis nas seções de entrada e saída do modelo, tranquilizadores de perturbações na lâmina d'água (colocados após os módulos na seção de adução água), placas direcionadoras de correntes, placas de limites laterais;

- Reprodução dos fenômenos físicos: após definidos os fenômenos mais relevantes que atuam na região, escolhem-se os equipamentos (geradores de correntes e marés, batedores de ondas) que os reproduzirão, e estes devem também ser calibrados obedecendo as escalas de semelhança (esforços, geométrica, tempo, etc).

- Instrumentação: de acordo com Martins e Souza (1989), é possível dividir os instrumentos em dois grupos distintos: instrumentação geral, que contém os dispositivos de macrocontrole do modelo (Tubo Dall, piezômetro, ponta liminométrica, etc) e instrumentação específica, dispositivos que medem grandezas instantâneas (micromolinetes, LVDT, sensores de deslocamento, etc). Diversas medidas podem ser feitas, seja de esforços em cabos de amarração, deslocamentos de embarcações devido às ondas, velocidades de correntes ou outros. Os dispositivos responsáveis por aferirem as medidas no modelo produzem sinais elétricos a partir dos fenômenos físicos, os quais devem ser traduzidos de maneira a serem interpretados e analisados em softwares específicos.

- Calibração do modelo físico: repetidos ensaios são realizados com o intuito de garantir que cada situação simulada forneça resultados coerentes com os dados extraídos do modelo numérico ou coletados em campo. Esta etapa, devido a sua enorme importância, deve ser executada sistematicamente de maneira a garantir a qualidade do processo de geração de dados. Para tanto são necessários alguns procedimentos para garantir o resultado esperado:

- ajuste da vazão de entrada, utilizando para isso a escala de conversão, ajustando também a vazão específica, direcionando o fluxo de água de acordo com as profundidades (através dos módulos tamponáveis);

- colocação de tranquilizadores para diminuir as perturbações na lâmina d'água e placas direcionadoras para induzir o escoamento;

- medição de velocidades nos pontos homólogos, devendo estas serem equivalentes em escala;

- verificação de trajetórias e velocidades médias de trechos conhecidos com dados coletados em campo, para garantir o rumo correto do escoamento. Neste procedimento as trajetórias dos derivadores são filmadas zenitalmente e o tempo é medido por um cronômetro simples.

- análise quali-quantitativa dos dados coletados nos procedimentos anteriores, verificação junto aos dados de campo e avaliação da necessidade de ajustes e correções;

- alterações, modificações e ajustes no modelo, iniciando novamente todo o processo de calibração.

- Validação do modelo físico: após a calibração, o modelo deve ser capaz de reproduzir qualquer outra situação da qual se tenha dados de campo ou do modelo numérico, mas que não tenham sido utilizados na calibração. O intuito é fazer com que o modelo opere conforme ocorre no protótipo, isto é, deve ser possível alterar qualquer variável ensaiada (vazão, altura de maré, amarração de navios e outras) e mesmo assim gerar resultados coerentes.

- Análise dos dados: segundo Martins e Souza (1989), compreendida como a recuperação dos dados e seu posterior tratamento numérico, tanto para a visualização do problema quanto para seu estudo estatístico. Nesta etapa, para cada tipo de fenômeno estudado determina-se o tipo de tratamento dos dados, se padronizado no caso de ondas e pressões ou específicos, no caso de esforços, deslocamentos, vazões, etc. A análise de cada caso deve ser feita minuciosamente e devem ser estabelecidos critérios na utilização dos dados adquiridos, ciente de que um modelo reduzido apresenta somente soluções possíveis do ponto de vista hidráulico, sem levar em conta outros fatores.

A calibração e validação do modelo garantem que os dados retirados do modelo representarão confiavelmente as mesmas situações no protótipo, fazendo-se as correlações necessárias através das escalas de semelhança.

Finalizado o processo de concepção dos modelos, inicia-se a exploração do modelo físico.

EXPLORAÇÃO DO MODELO

No estudo dos efeitos causados por fenômenos naturais em obras costeiras através de modelos reduzidos, alguns critérios de exploração devem ser seguidos, bem como uma sequência de etapas com o propósito de garantir êxito frente às exigências impostas em projeto. A principal utilidade dos modelos físicos é permitir, através de um estudo detalhado, que sejam feitas previsões acerca do comportamento das regiões costeiras e das obras ali implantadas devido à ação dos fenômenos naturais, assim como analisar os efeitos que as mesmas produzem sobre a região, visando conceber um projeto que considere a obra em todos os seus contextos mais pertinentes. As etapas consideradas por Pimenta (1971) para exploração do modelo físico são:

1. Coleta de dados tanto quantitativos ou visuais quanto qualitativos obtidos através de medições, a partir daí se elaboram hipóteses de trabalho;

2. Correções das deficiências observadas nas hipóteses ou que tenham a possibilidade de vir a atingir condições preestabelecidas em projeto;

3. Implementação das correções no modelo físico e nova coleta de dados, retornando à primeira etapa.

Portanto, para que um modelo possa ser utilizado de maneira eficiente, deve-se atentar para os fenômenos a serem representados e a devida infraestrutura para que estes possam ser colocados em prática, viabilizando o estudo em questão. Garantir também a confiabilidade dos dados coletados através de uma boa calibração, aferição e validação permite um melhor aproveitamento

do modelo. A experiência aliada ao conhecimento teórico é que fazem com que se obtenha sucesso nestes estudos.

DISCUSSÃO E RESULTADOS

Verifica-se, dentro deste processo, que o modelo físico está intimamente ligado ao modelo numérico sendo possível identificar as etapas em que se faz uso deste último para aprimorar a concepção e exploração do primeiro. Sendo assim, podemos distinguir três etapas onde o auxílio do modelo numérico é de grande importância. São elas:

1. Após a calibração e validação do modelo matemático pode-se obter as vazões nas seções de referência, assim como a vazão a ser aduzida no modelo físico, para que as correntes na região sejam reproduzidas adequadamente em qualquer situação de maré;

2. Quando não é possível modelar toda uma baía ou as duas margens de um estuário, o ideal é que os limites do modelo físico se alinhem com as linhas de correntes, portanto, é importante conhecer as linhas de correntes para definir a direção das paredes do modelo. Em planta, este procedimento é mostrado na Figura 1, onde o modelo numérico do TPM-Norte está sobreposto à área disponível para a construção:

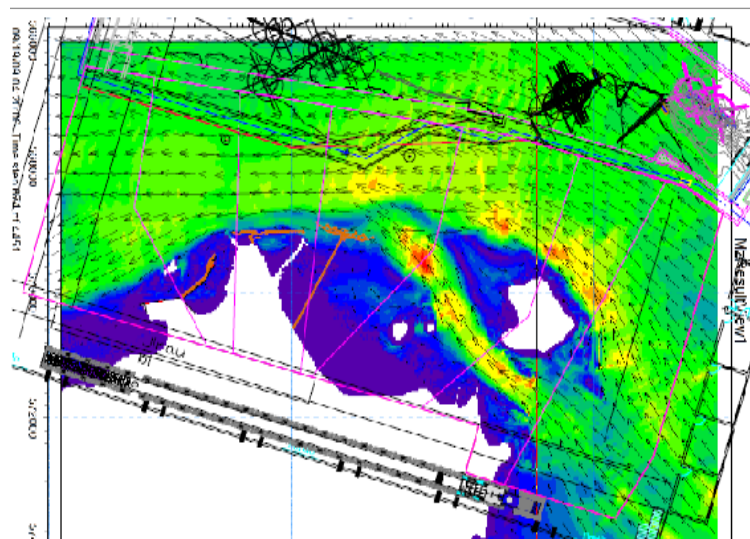


Figura 1 – Auxílio do modelo matemático na determinação da direção das paredes do modelo.

3. Algumas vezes, já no processo de calibração, é necessário conhecer velocidades ou trajetórias de derivadores de locais onde não se dispõe de dados de campo. Nestas situações, é possível extrair essas informações tendo-se um modelo numérico calibrado, e utilizá-las no processo de calibração e validação do modelo físico.

CONCLUSÃO

Por serem de grande vulto e alto impacto, as obras nas regiões costeiras carecem de estudos mais aprofundados e minuciosos previamente à execução das mesmas. Com o desenvolvimento dos

conhecimentos técnicos nas áreas de hidráulica marítima e obras costeiras, aliada à necessidade de maior atenção para com o meio ambiente, os modelos físicos em escala reduzida e os matemáticos vêm ocupando um espaço de maior destaque tanto no meio acadêmico quanto para as empresas do setor. É possível, portanto, que os dados de um modelo alimentem o outro e vice-versa, garantindo ainda mais confiabilidade, cruzando-se os resultados e avaliando-se a equivalência entre eles. Vale ressaltar que estes estudos podem se estender, embasando decisões estratégicas e econômicas das empresas, tornando-se uma ferramenta vantajosa.

Assim, conclui-se que a utilização dos modelos físico e numérico em conjunto, obtendo-se o que há de melhor em cada um deles, é altamente recomendável pois permite o desenvolvimento de melhores projetos, execuções, monitoramentos e previsões de cenários futuros, incentivando melhores estudos de obras costeiras e estuarinas.

REFERÊNCIAS

ALFREDINI, P., ARASAKI, E., “Obras e gestão de portos e costas: a técnica aliada ao enfoque logístico e ambiental”. Ed. Blucher, São Paulo, 2009.

ALMEIDA, C. E., CUOMO, A. R., OLIVEIRA, E. F., PIMENTA, C. F., “Semelhança”. Curso de mestrado da EPUSP, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1968, paginação irregular.

CABELKA, J., NOVAK, P., “Models in Hydraulic Engineering – Physical Advanced Publishing Program”. Pitman Advanced Publishing Program, 1981, 459p.

GIRELI, T. Z., “Modelação física em canal da geração de ondas regulares e irregulares para estudo de quebra-mar de enrocamento.” Tese de doutorado apresentada na EPUSP, Universidade de São Paulo, 2008, 275p.

MARTINS, J. R. S., SOUZA, P. A., “Tópico 1 – Análise Dimensional e semelhança, modelos e instrumentação”. Em: “Curso sobre Semelhança e modelação física em hidráulica”. Departamento de Engenharia Hidráulica da EEUFMG e Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica – FCTH, 1989, 366p.

PIMENTA, C. F., “Modelos Fluviais”. Curso de mestrado da EPUSP, Universidade de São Paulo, 1971, 104p.

PORTO, R. M., “Hidráulica Básica”. Ed. São Carlo – EESC-USP, 1999, 519p.