

# Estimativa das máximas pistas de vento no reservatório da barragem de Ilha Solteira, Estado de São Paulo

Marcelo Marques<sup>1\*</sup>, Geraldo de Freitas Maciel<sup>2</sup> e Milton Dall'Aglio Sobrinho<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Centro de Tecnologia, Campus Regional de Umuarama, Universidade Estadual de Maringá, PR 489, 1400, 87508-210, Umuarama, Paraná, Brasil. <sup>2</sup>Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, São Paulo, Brasil. <sup>3</sup>Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, São Paulo, Brasil. \*Autor para correspondência. E-mail: mmarques@uem.br

**RESUMO.** Grande parte dos métodos empregados na estimativa da altura de ondas, geradas pela ação do vento, necessita da determinação do comprimento da pista sobre a qual o vento atua. A escolha do método depende da natureza do corpo de água, podendo ser aplicável a áreas oceânicas ou a corpos d'água interiores, como baías, lagos e reservatórios. Uma das soluções rotineiras tem sido a aplicação direta do método validado em águas oceânicas para águas interiores sem levar, portanto, em consideração, o efeito de restrição oferecido pelas margens. Não obstante, a excessiva quantidade de operações do método aplicado a corpos de água interiores (onde a margem é condição de restrição), pode, se não usado uma base gráfica suficientemente precisa da margem acrescido da subjetividade do operador, não assegurar um grau de precisão satisfatório. Assim exposto, esta comunicação científica traz à luz esta discussão, propondo uma solução clássica baseada na aplicação do método adequado a águas interiores (Saville *et al.*, 1954), via processamento automatizado. Para tanto, foi desenvolvido um programa em linguagem computacional AutoLISP. A aplicação do programa determinou as máximas pistas de vento no reservatório da barragem de Ilha Solteira, Estado de São Paulo, como estando entre 9,5 e 12,5 km, contrariamente a um estudo anterior que havia previsto pistas bem superiores (fator da ordem de 3).

**Palavras-chave:** onda, pista de vento, onda em lago, reservatório, lago.

**ABSTRACT. Estimation of the maximum wind fetches in Ilha Solteira, state of São Paulo, reservoir.** Most methods employed to estimate the height of waves generated by the wind require the surface length over which the wind blows. The choice of method depends on the nature of the water body, being applicable to ocean areas or interior water bodies, such as bays, lakes and reservoirs. One of the usual solutions has been the direct usage of the method validated in ocean waters for interior waters, therefore, not taking into consideration the effect of the restriction imposed by the shores. Nevertheless, the excessive quantity of operations of the method applied to interior water bodies (where the shore is a restraint condition) may not assure a satisfactory precision degree, unless an accurate enough graphic base of the shore with the addition of the operator's subjectivity is used. Thus, this scientific community brings this discussion to light, proposing a classic solution based on the application of the adequate method to interior waters (Saville *et al.*, 1954), via automatized processing. Therefore, a program in AutoLISP, a computational language, has been developed. The application of the program has determined the maximum wind fetches in Ilha Solteira, state of São Paulo, reservoir as being between 9.5 and 12.5 km, in contrast with a previous study which has predicted far longer fetches (factor of three).

**Key words:** wave, wind fetch, wave in lake, reservoir, lake.

## Introdução

Grande parte do interesse do estudo dos efeitos das ondas no lago da Usina Hidrelétrica de Ilha Solteira, Estado de São Paulo, provém de sua localização estratégica. O lago faz parte do complexo de navegação Tietê-Paraná, tendo como elemento de destaque o canal de partilha de Pereira Barreto. Assim, o conhecimento do regime de ventos e ondas

nesta área não só contribui nas condições de navegabilidade como também na estimativa da capacidade erosiva destas junto às margens do reservatório.

Quando a onda é gerada pela ação do vento em grandes espelhos de água como oceanos, baías, rios, lagos e reservatórios, a altura da onda fica condicionada a três fatores relacionados ao vento: a

velocidade, a duração e a pista sobre a qual ele sopra. Na grande maioria dos métodos empregados para a estimativa de ondas, o comprimento desta pista entra como uma variável importante e que deve ser determinada com precisão.

Estudos recentes foram realizados no lago de Ilha Solteira, Estado de São Paulo, destacando Lima *et al.* (2003) que determinou o comprimento das máximas pistas de vento em águas interiores pelo método aplicável a águas oceânicas. Diferentemente de Lima *et al.* (2003), no estudo aqui realizado, o comprimento das pistas é determinado pelo método de Saville *et al.* (1954), por este considerar a influência da margem.

A aplicação deste método de forma eficiente e suficientemente precisa levou à execução de um aplicativo em linguagem AutoLISP que determina o comprimento da pista de vento em um grande número de pontos em um período de processamento satisfatório.

Pretende-se assim, determinar o comprimento das maiores pistas de vento para cada direção, no reservatório da barragem de Ilha Solteira, fornecendo, de forma precisa e definitiva, condições favoráveis para a estimativa de ondas.

### Formulação teórica

A pista de vento é a área geradora de ondas, e é definida como sendo a região na qual a velocidade e direção do vento podem ser consideradas aproximadamente constantes. Segundo o U.S. Army Coastal Engineering Research Center (1983), esta velocidade é considerada constante quando as variações não excedem  $2,5 \text{ m s}^{-1}$  com relação à velocidade média.

O efeito da largura da pista de vento pode ser desprezado em áreas de geração que possuem a largura tão grande quanto, ou superiores ao comprimento. Esta situação é comumente identificada em áreas oceânicas.

Na oceanografia, um termo técnico para referir-se à pista de vento em mar é *fetch*, definido como a distância normal, na direção do vento, da praia à estrutura a ser projetada.

Já em águas interiores, as pistas são limitadas pelo formato das margens que contornam tais corpos d'água. Pistas de vento de grande comprimento, se comparado à largura, são freqüentemente encontradas, e a influência do entorno não pode ser desprezada. Estes casos de área de geração afetada pela margem resultam em altura de ondas significativamente menores se comparadas às mesmas condições de geração em corpos de água sem limitação marginal.

### Material e métodos

Saville *et al.* (1954) propôs um método para determinar o efeito da largura da pista na geração da onda. Este método se aplica a corpos d'água de largura uniforme, como canais. Na grande maioria dos casos de águas interiores, as margens são irregulares, e o método proposto por Saville *et al.* (1954) deixava de contemplá-los.

Devido a forte influência da margem na determinação do comprimento efetivo da pista de vento, U.S. Army Coastal Engineering Research Center (1977) recomenda um método de estimativa de pista mais geral quanto possível.

Saville *et al.* (1954) propõe então, um segundo e mais abrangente método que consiste na construção de 19 linhas radiais a partir do ponto de incidência da onda em intervalos de  $5^\circ$ , de tal modo que as radiais extremas formem com a direção do vento um ângulo de  $45^\circ$ . Cada uma destas radiais deve se estender até a margem, conforme ilustrado pela Figura 1.

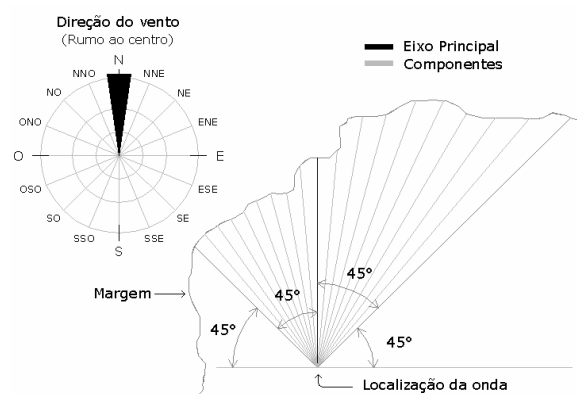


Figura 1. Pista de vento esquemática para a direção norte.

Para o cálculo do comprimento da pista efetiva, esta passa a ser a projeção dos segmentos no eixo principal sendo que a amplitude máxima do segmento mais distante do eixo principal é de  $45^\circ$ , de acordo com a Figura 1. Neste método desprezam-se os fenômenos de refração e reflexão, ou seja, supõe-se que as ondas serão completamente absorvidas pelas margens. Considera-se que a direção do vento é uniforme e que mantém a mesma direção dentro da área de geração. Despreza-se ainda, a influência da topografia marginal, considerando o relevo a uma mesma cota da lâmina de água. O comprimento da pista é obtido pela seguinte relação:

$$F = \frac{\sum_i x_i \cos \alpha_i}{\sum_i \cos \alpha_i} \quad (1)$$

$\alpha_i$  : ângulo entre a direção principal e a direção secundária;

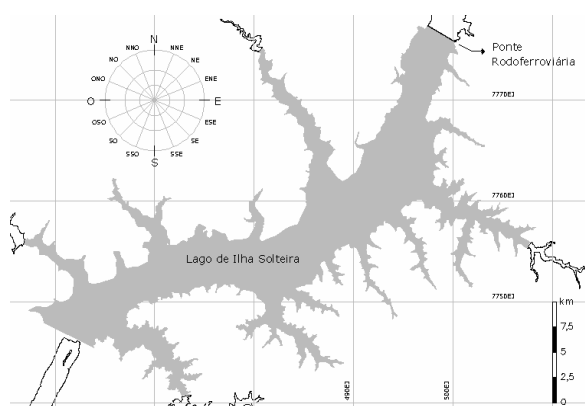
$x_i$  : comprimento na direção secundária.

Ainda de acordo com o autor, outros ângulos entre radiais podem ser utilizados no mesmo procedimento.

### Georreferenciamento do lago

A importância da determinação gráfica suficientemente precisa do contorno da margem revelou a idéia da importância da base sobre a qual ela seria extraída. Esta base assume papel fundamental no processo de determinação das pistas de vento, pela influência direta nos resultados, e é definida como um mapa, uma imagem de satélite ou qualquer outro elemento que permita a extração do contorno da margem.

Partindo de uma foto de satélite, as margens foram contornadas no ambiente AutoCAD e o conjunto foi georreferenciado, conforme Figura 2.



**Figura 2.** Georreferenciamento do lago de Ilha Solteira, Estado de São Paulo.

A partir desta imagem georreferenciada, é identificado o contorno da margem de modo a posterior aplicação pelo método de Saville *et al.* (1954).

### Programa

A aplicação do método de Saville *et al.* (1954) em alguns pontos isolados do lago se mostrou uma tarefa excessivamente trabalhosa, mesmo fazendo uso de programas gráficos e planilhas de cálculo. A definição do comprimento da pista, em um ponto e direção qualquer do lago, ficou condicionada à forte influência da irregularidade da margem, dificultando a indicação segura de um ponto como sendo de pista máxima. Esta variação no plano da superfície do lago descarta uma análise pontual e leva a uma comparação entre pontos próximos. A conclusão sobre a maior pista seria mais precisa tanto quanto

maior fosse a quantidade de pontos considerados.

A idéia foi estabelecer uma malha que discretizasse a área interna do lago, tendo a margem como fronteira. Os pontos de interesse passaram a ser representados pelos nós da malha.

Desta maneira, surgiu a necessidade de uma ferramenta que utilizasse os recursos gráficos aliados a uma capacidade de processamento matemático permitindo, assim, a discretização da superfície do lago e a posterior determinação da pista máxima para cada direção, em cada nó da malha.

Após investigar algumas linguagens computacionais, decidiu-se por utilizar a linguagem computacional AutoLISP, por dispor de uma variedade suficiente de recursos de manipulação de estruturas de dados genéricos aliada a uma imprescindível interface gráfica, e por pertencer ao ambiente operacional do AutoCAD, amplamente difundido comercialmente.

### Aspectos do AutoLISP

O AutoLISP, que surgiu nos meados da década de 1980, é uma implementação da linguagem LISP desenvolvida dentro do ambiente do AutoCAD. De acordo com Tanajura (2004), o AutoCAD é o programa estruturado em programação direcionada a objetos mais difundido do mundo.

O AutoLISP foi inspirado no Lisp devido à flexibilidade e eficiência desta linguagem para tratar estruturas de dados não uniformes. O Lisp é uma linguagem de programação científica, criada durante a década de 1950, nos Estados Unidos, mais especificamente no MIT (*Massachusetts Institute of Technology*). Devido às suas características de programação recursiva e manipulação de estruturas de dados genéricas, o Lisp tornou-se a linguagem de programação padrão no desenvolvimento de sistemas de inteligência artificial.

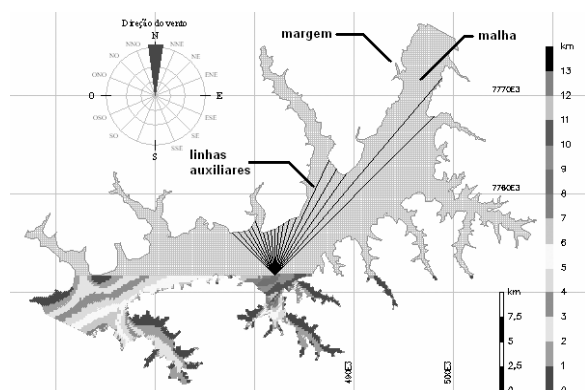
Criado de modo a facilitar o desenvolvimento e depuração de rotinas em linguagem AutoLISP, o VisualLISP é a nova geração de ambiente de programação em AutoLISP.

### Considerações de programação

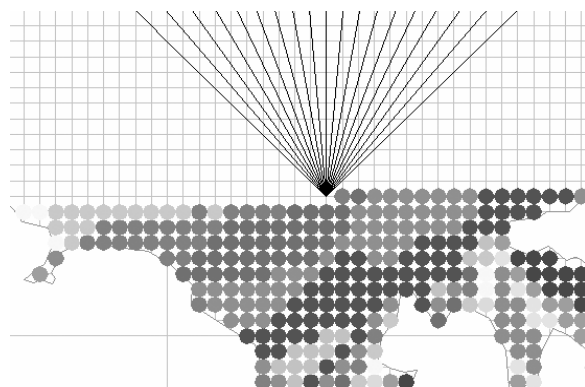
A linha da margem, por limitar a fronteira entre o lago e o meio externo, foi utilizada pelo programa como o objeto de referência na circunscrição da malha a ser traçada. A margem passou a ser transformada em objeto gráfico por meio do traçado, pelo operador, de uma linha sobre uma base em escala adequada. A base pode ser um mapa, uma foto aérea ou uma imagem qualquer que possibilite destacar o contorno da margem. A escolha da base depende da precisão necessária no estudo. A linha

traçada é entendida pelo programa como um objeto no qual a malha não pode atravessá-lo. Ao executar o programa é solicitado ao operador a indicação da margem, a direção a serem projetadas as linhas auxiliares e a distância entre os nós da malha. A linha da margem é informada ao programa por meio de um clique do mouse sobre a mesma, previamente traçada pelo operador. A distância entre os nós e a direção do vento são fornecidos, via teclado, diretamente na linha de comando do AutoCAD, e sua escolha fica a critério do operador. Transpostas estas etapas, o programa percorre cada nó da malha aplicando o método proposto por Saville *et al.* (1954) em cada um deles.

As Figuras 3 e 4 ilustram uma situação em que o processamento foi interrompido propositalmente de modo a demonstrar os elementos anteriormente descritos. Trata-se da execução do programa para a direção norte. O objetivo da Figura 4 é o de mostrar o exato posicionamento da origem das linhas auxiliares sobre cada nó da malha gerada.

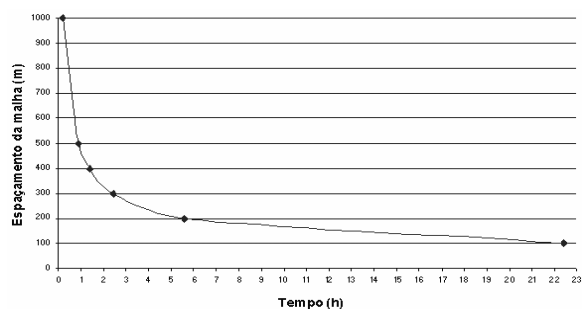


**Figura 3.** Detalhe dos elementos gráficos envolvidos na execução do programa.



**Figura 4.** Ampliação de 32 vezes de parte da Figura 3.

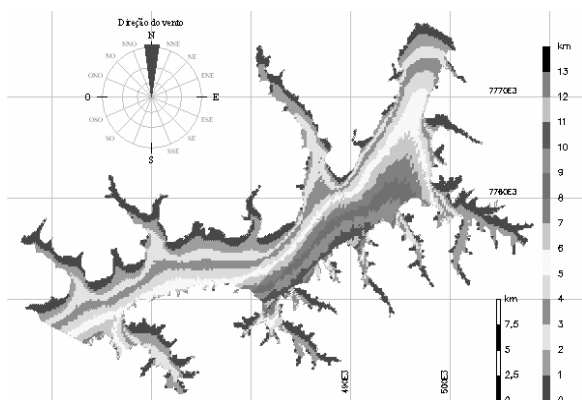
A liberdade do operador na escolha da distância entre os nós da malha é condicionada pela relação entre o tempo de processamento e a quantidade de nós a processar, conforme ilustrado pela Figura 5.



**Figura 5.** Tempo de processamento do programa em função do espaçamento da malha.

A Figura 5 leva em consideração o processamento por um computador com procesador da classe Athlon XP 1700, ambiente Windows XP e 512 MB de memória.

Para a aplicação deste estudo a cada uma das 16 direções, decidiu-se por uma malha de 200 metros, sendo o tempo de 5,5 horas considerado o tolerável para o processamento das informações. Para o lago de Ilha Solteira um espaçamento de 200 metros entre os nós gerou uma malha contendo 10238 pontos. A Figura 6 ilustra o resultado de 5,5 horas de processamento em uma dada direção. A direção Norte foi escolhida em caráter ilustrativo por complementar as Figuras 3 e 4.

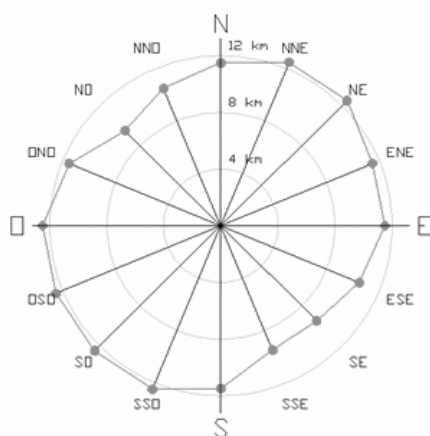


**Figura 6.** Determinação das pistas de vento para a direção norte.

A repetição deste processo 16 vezes, uma para cada direção, fornece as imagens do lago identificadas por cores, conforme Figura 6, permitindo a geração de um diagrama em formato radial que represente o comprimento das maiores pistas de vento para cada direção.

## Resultados e discussão

Após o processamento do programa nas 16 direções, as maiores pistas de vento foram identificadas e o diagrama gerado está ilustrado pela Figura 7.



**Figura 7.** Pistas de vento máximas no lago de Ilha Solteira, Estado de São Paulo.

Na Figura 4 pode ser verificado não somente o maior comprimento da pista de vento para a direção considerada, mas também sua localização no lago, o que é objeto de outros estudos em desenvolvimento pelos autores. Ao todo, foram quase 90 horas de processamento.

Nos estudos realizados por Lima *et al.* (2003) no lago de Ilha Solteira, foi determinado o comprimento das pistas de vento em águas interiores pelo método aplicável a águas oceânicas. Esta decisão é perfeitamente justificável tendo em vista a dificuldade em aplicar o método de Saville *et al.* (1954) devido ao excessivo número de operações a serem executadas pelo projetista. As pistas analisadas pelos autores consistiram na de direção Nordeste e Leste, por serem as direções de maior frequência de ocorrência de ventos, de acordo com os autores. Os pontos eram determinados com base na experiência do projetista e, portanto, com alto grau de subjetividade. Os comprimentos da pista obtidos por Lima *et al.* (2003) foram de 40 km para a direção Nordeste e 25 km para a direção Leste, em contraposição com os 12,5 e 11,5 km, respectivamente, determinados pelo presente estudo. As discrepâncias entre os resultados podem ser atribuídas a um dos seguintes fatores ou a uma combinação deles:

- os diferentes métodos empregados na determinação da pista de vento. Enquanto que no método aplicável a águas interiores (método de Saville *et al.* (1954)) o efeito das margens é contemplado na determinação do comprimento da pista, no método aplicável em águas oceânicas, a pista de vento é avaliada como a distância da costa até o ponto considerado;

- a diferença entre as bases sobre as quais foi extraído o contorno da margem;

- a parcela de subjetividade do projetista na determinação do ponto como sendo de pista máxima.

Acredita-se que a maior parcela de erro é devida a diferença entre os métodos empregados, seguindo-se a subjetividade e por último, a diferença entre as bases. Por maior que seja a subjetividade e por mais deformado que esteja o mapa utilizado, supondo correta a escala, as diferenças são muito grandes para serem atribuídas em parcela considerável às duas últimas fontes comentadas.

## Conclusão

Uma determinação precisa do comprimento das pistas de vento tem início com a escolha adequada da base sobre a qual a margem é extraída.

O programa, executado em linguagem AutoLISP, ao ser processado em cada nó da malha, eliminou a subjetividade do operador no processo, conforme o pretendido, gerando regiões identificadas por meio de cores. Isto permitiu determinar o comprimento das pistas máximas, além de possibilitar a localização das coordenadas dos pontos de ocorrência, graças ao georreferenciamento da base.

O programa permite, ainda, a aplicação de forma análoga a outros lagos.

O método proposto por Saville *et al.* (1954), de aplicação difícil pelo projetista, por exigir uma excessiva quantidade de operações gráficas, pôde ser aplicado com sucesso pela utilização de processamento computacional.

Para o lago de Ilha Solteira, os máximos comprimentos determinados pelo estudo variam de 9,5 a 12,5 km, dependendo da direção considerada.

Comparativamente aos resultados obtidos por Lima *et al.* (2003) os motivos que influenciaram a divergência entre os valores puderam ser atribuídos ao método aplicável a águas oceânicas, à diferença da base sobre a qual foi obtido o contorno da margem e ao elevado grau de subjetividade do processo devido a pequena quantidade de pontos analisados.

Um abraço, dos aspectos que deve ser revisto é a tentativa de redução do tempo de processamento, que atualmente, é de aproximadamente 5,5 horas para cada direção, relativo ao equipamento disponível.

O presente trabalho contribuiu de forma significativa para uma definição segura desta importante variável necessária na estimativa de altura de ondas geradas pelo vento.

Uma futura abordagem contemplando diretamente a altura das ondas pela utilização de métodos semi-empíricos, se apresenta, a partir deste estudo, como uma tarefa possivelmente exequível.

### Agradecimentos

Ao CNPq e ao Programa de Cooperação Acadêmica Procad/Capes – 0144/01-0 (Rede Cooperativa de Pesquisa em Hidrodinâmica de Águas Rasas - “Amigos de Boussinesq”) pelo financiamento da bolsa de mestrado do 1º autor.

### Referências

LIMA, S.F. *et al.* Estimativa das maiores ondas geradas pelo vento no reservatório de Ilha Solteira. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS*, 15., 2003, Curitiba. *Anais...* Curitiba: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2003, v. 1. p. 1-19.

SAVILLE, T. *et al* The effect of fetch width on wave

generation. *J. Tech. Mem.*, Washington, D.C, n. 70, 1954.

TAJADURA, J.A.; LÓPEZ, J. *AutoCAD avanzado*. Madrid: McGraw-Hill, 2004.

U.S. ARMY COASTAL ENGINEERING RESEARCH CENTER. *Shore protection manual*. 3<sup>rd</sup> ed. Washington, D.C.: Department of the Army Corps of Engineers, 1977. v. 2.

U.S. ARMY COASTAL ENGINEERING RESEARCH CENTER. *Shore protection manual*. 3<sup>rd</sup> ed. Washington, D.C.: Department of the Army Corps of Engineers, 1983. v. 1.

*Received on June 13, 2005.*

*Accepted on May 05, 2007.*