

## II JORNADAS TÉCNICAS DA APRH

ÁGUAS DE ABASTECIMENTO E SANEAMENTO  
EM ZONAS COSTEIRAS TURÍSTICASPLANEAMENTO E GESTÃO DOS SISTEMAS DE ÁGUA DE ABASTECIMENTO  
EM ZONAS CARENCIADASSIMULAÇÃO DA EXPLORAÇÃO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS EM ZONAS COSTEIRAS  
POR  
ANTÓNIO SÃ DA COSTA

Doutor em Engenharia Civil, Professor Associado de Recursos Hídricos do Instituto Superior Técnico, Membro 214 da APRH, Sócio Fundador da HIDROSISTEMAS, Estudos Especiais de Sistemas Hídricos e Ambientais Lda, Lisboa, Portugal.

RESUMO

O problema da exploração de águas subterrâneas em zonas costeiras, onde geralmente os consumos de água são elevados, põe problemas relativos à contaminação por intrusão da água salgada. Para a correcta gestão dos recursos hídricos disponíveis é necessário analisar e simular as situações esperadas. Nesta comunicação apresenta-se uma metodologia para resolver tais problemas com a diversidade de situações, quer da exploração quer hidro-geológicas, que aparecem em problemas reais. O modelo apresentado ilustra um conjunto de situações típicas que podem surgir sendo a única via válida para a resolução prática deste tipo de problemas.

Desde sempre que as zonas costeiras atraíram mais as populações do que as zonas interiores. Com a evolução dos tempos e o progressivo aumento do nível de qualidade de vida das populações este facto tem vindo a mostrar-se cada vez mais predominante. Assim as zonas costeiras constituem hoje em dia um pólo de atracção turístico, fundamentalmente na época estival, mas também um pólo de atracção para a população permanente com o conseqüente crescimento nas actividades industriais, agrícolas de recreio. Este crescimento só é possível, se além das condições topo geográficas favoráveis for possível dispor de água doce em quantidade e qualidade compatíveis com o desenvolvimento.

O abastecimento de água potável das zonas costeiras faz-se ou a partir de origens superficiais, geralmente localizadas a grandes distâncias dos locais de consumo, ou a partir de origens subterrâneas, geralmente a distâncias mais curtas dos locais de consumo. Na presente comunicação discutem-se aspectos relativos a este último tipo de origem.

É sobejamente conhecido que a água flui para o oceano subterraneamente, e que se atingiu, ao longo dos séculos, um equilíbrio entre a água doce, menos densa, e a água salgada, mais densa. Este equilíbrio, apresenta por assim dizer, o aspecto de uma cunha salina sob a água doce que se escoam para o mar. Entre estes dois aspectos que a água pode apresentar, existe uma zona de transição onde ocorrem fenómenos de dispersão e mistura e onde a água é por assim dizer salobra. Na maioria dos casos a espessura desta zona é relativamente reduzida quando comparada com as restantes dimensões em jogo (exceptuam-se as zonas junto à costa onde a influência da maré faz aumentar a espessura e certas formações geológicas até agora não confiadas em Portugal). Assim é possível considerar que a água doce e a água salgada são miscíveis e estão separadas por uma interface.

É pois este o panorama que se deparava até a algumas dezenas de anos atrás. Com o desenvolvimento este equilíbrio secular foi alterado devido a uma maior exploração dos aquíferos costeiros. Como consequência da maior extracção de água doce vem o avançar da cunha salina e a conseqüente diminuição das reservas disponíveis e também a sua progressiva salinização.

Dada a complexidade e variabilidade das formações geológicas e das situações de exploração só há uma forma de poder prever a evolução da cunha salina e que é usando um modelo numérico. Esse modelo terá de ser capaz de reproduzir situações reais com precisão e com a flexibilidade adequada à complexidade de cada caso. Terá ainda que ser capaz de reproduzir o movimento do pé da cunha salina, lugar geométrico da intersecção da interface com a base impermeável do aquífero. Pois esta linha, apesar de pouco importante do ponto de vista hidrodinâmico, é um indicador preciso do estado de avanço da intrusão salina.

Na presente comunicação apresenta-se o modelo MISA (Modelo de Intrusão Salina em Aquíferos) que é capaz de reproduzir as situações atrás descritas e ainda o caso de aquíferos em ilhas em que a água doce aparece na forma de lente flutuando em água salgada sem pé de cunha salina.

Na presente comunicação apresenta-se o modelo MISA (Modelo de Intrusão Salina em Aquíferos) que é capaz de reproduzir as situações atrás descritas e ainda o caso de aquíferos em ilhas em que a água doce aparece na forma de lente flutuando em água salgada sem pé de cunha salina.

Dada a complexidade e variabilidade das formações geológicas e das situações de exploração só há uma forma de poder prever a evolução da cunha salina e que é usando um modelo numérico. Esse modelo terá de ser capaz de reproduzir situações reais com precisão e com a flexibilidade adequada à complexidade de cada caso. Terá ainda que ser capaz de reproduzir o movimento do pé da cunha salina, lugar geométrico da intersecção da interface com a base impermeável do aquífero. Pois esta linha, apesar de pouco importante do ponto de vista hidrodinâmico, é um indicador preciso do estado de avanço da intrusão salina.

Na presente comunicação apresenta-se o modelo MISA (Modelo de Intrusão Salina em Aquíferos) que é capaz de reproduzir as situações atrás descritas e ainda o caso de aquíferos em ilhas em que a água doce aparece na forma de lente flutuando em água salgada sem pé de cunha salina.

MISA utiliza elementos finitos, pois eles representam melhor os limites, permitem uma discretização mais flexível de um mais fácil tratamento de anisotropias e de não-homogeneidades. Além disso, MISA utiliza um método para calcular o p̄ da cunha salina, baseado numa rede de elementos finitos fixa, que utiliza os pontos de quadratura de Gauss usados na integração espacial dos elementos. Elementos isoparamétricos mistos de 4 a 8 n̄s usados em MISA conjuntamente com o método Galerkin. Para integração no tempo utilizam um esquema implícito baseado nas diferenças finitas. As equações, não lineares devido a movimento da superfície freática ou da interface, são resolvidas utilizando uma modificação ao método de Newton-Raphson.

O algoritmo para reproduzir o movimento do p̄ da cunha salina utiliza uma descrição não-linear das propriedades hidráulicas dentro dos elementos que contêm esse p̄.

DESCRIÇÃO DO MODELO

Equações gerais

A derivada exacta da equação que traduz o movimento de uma interface entre dois líquidos imiscíveis é apresentada por BEAR (1972) (pp.524-526). Esta equação só para casos extremamente simples tem solução analítica. Para o caso de intrusão salina em aquíferos as equações gerais utilizadas no presente modelo são deduzidas em SA DA COSTA e WILSON (1979), apresentando-se em seguida a sua forma final em notação tensorial:

Água doce

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (K_{ij}^f x_j b^f \frac{\partial \phi^f}{\partial x_j}) + \frac{K_m^f}{b_m^f} (\phi_m^f - \phi^f) + q^f + N =$$

$$= (S^f + n \frac{\gamma^f}{\Delta \gamma}) \frac{\partial \phi^f}{\partial t} - n \frac{\gamma^s}{\Delta \gamma} \frac{\partial \phi^s}{\partial t} \quad i, j, m=1, 2 \quad (1)$$

Equações gerais

Água salgada

A derivada exacta da equação que traduz o movimento de uma interface entre dois líquidos imiscíveis é apresentada por BEAR (1972) (pp.324-326). Esta equação só para casos extremamente simples tem solução analítica. Para o caso de intrusão salina em aquíferos as equações gerais utilizadas no presente modelo são deduzidas em SA DA COSTA e WILSON (1979), apresentando-se em seguida a sua forma final em notação tensorial:

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (K_{ij}^s x_j b^s \frac{\partial \phi^s}{\partial x_j}) + \frac{K_m^s}{b_m^s} (\phi_m^s - \phi^s) + q^s =$$

$$= (S^s + n \frac{\gamma^s}{\Delta \gamma}) \frac{\partial \phi^s}{\partial t} - n \frac{\gamma^f}{\Delta \gamma} \frac{\partial \phi^f}{\partial t} \quad i, j, m=1, 2 \quad (2)$$

encontrando-se alguns destes termos definidos na Figura 2. Além destas equações utiliza-se a equação de continuidade da pressão ao longo da interface:

$$\zeta = \frac{\gamma^s}{\Delta \gamma} \phi^s - \frac{\gamma^f}{\Delta \gamma} \phi^f$$

Nestas equações os expoentes <sup>f</sup> e <sup>s</sup> representam respectivamente uma quantidade relativa a água doce ou a água salgada e;

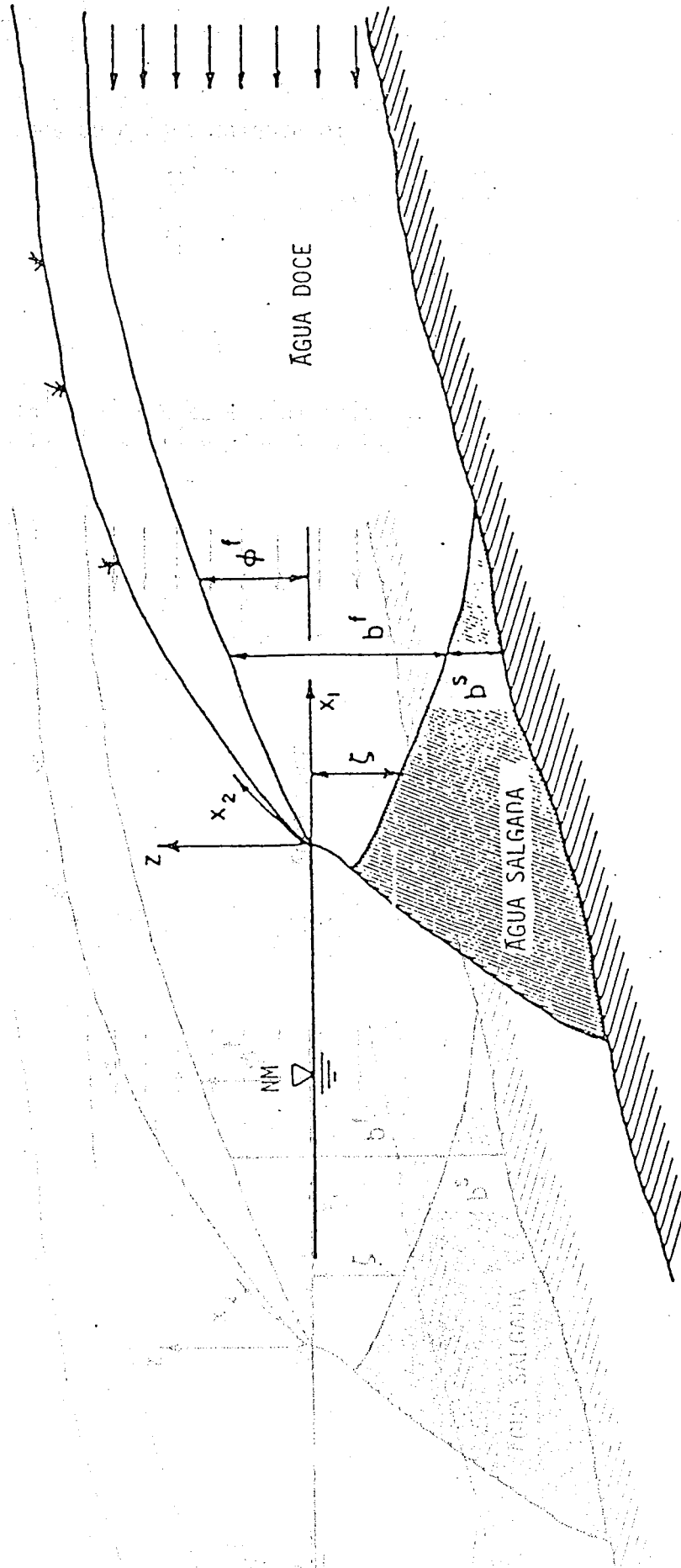


Figura 14 - Definição de variáveis numa secção tipo de um aquífero costeiro.

- $x_i, x_j$  - coordenadas cartesianas
- $K_{x_i x_j}$  - componentes do tensor condutividade hidráulica (L/T)
- $b$  - altura saturada (L)  
- altura piezométrica (L)
- $K'_m$  - condutividade hidráulica da camada semi-permeável (=0 se não existe),  
m=1 camada superior, m=2 camada inferior (L/T)
- $b'_m$  - espessura da camada semipermeável (L)
- $\phi'_m$  - altura piezométrica no aquífero adjacente à camada semi-permeável,  
m=1, 2 (L)
- $q$  - caudal dum poço ou de uma nascente (L/T)
- $N$  - recarga natural (=0 em aquíferos confinados) (L/T)
- $S$  - coeficiente de armazenamento (armazenamento específico em aquíferos confinados ou cedência específica em aquíferos freáticos) (-)
- $n$  - porosidade efectiva (-)
- $\gamma$  - peso específico  $\Delta\gamma = \gamma^s - \gamma^f$  (M/L<sup>2</sup>/T)
- $t$  - tempo (T)

Na dedução destas equações foi considerado que:

- existe uma interface imiscível entre a água doce e a água salgada,
- a lei de Darcy é válida
- não são consideradas variações na vertical dos parâmetros de aquífero,
- a hipótese de Dupuit é válida, isto é, o escoamento é essencialmente horizontal,
- o escoamento vertical é apenas considerado nos fenómenos de drenância (leakage) e na recarga natural,
- o peso específico das duas fases líquidas é contado,
- as duas fases líquidas são homogêneas, isotrópicas e enchem completamente todos os poros da zona saturada do meio poroso.

### Condições de fronteira

Para resoluções das equações diferenciais (1) e (2) são necessárias condições de fronteira. Três tipos de condições de fronteira são geralmente consideradas:

- especificidade da altura piezométrica, também conhecida por condição de fronteira do primeiro tipo, de Derichelet, essencial ou geométrica.
- especificação do caudal ou fluxo, também chamada condição de fronteira do segundo tipo, de Newman, natural ou forçada, e que não é mais que a especificação da primeira derivada da altura piezométrica.
- condição fronteira mista, do terceiro tipo ou misto, que é a definida pela especificação da altura piezométrica no aquífero adjacente o que indirectamente estabelece o caudal do fenómeno de drenância.

No presente modelo esta terceira condição de fronteira já está incluída na equação geral, devido a razões de estrutura do modelo. Para a condição de fronteira ao longo da costa para a água doce utiliza-se também uma condição fronteira do terceiro tipo. Aproximação semelhante foi usada por BEAR e DAGAN (1964) e PINDER e PAGE (1976).

## Integração no espaço e no tempo

Como já foi referido na discretização do espaço por MISA utilizou-se o método dos elementos finitos com a aproximação de Galerkin. As equações gerais (1) e (2) são por este método reduzidos a uma equação matricial relativamente simples, ver SÁ DA COSTA e WILSON (1979):

$$\underline{C} \frac{dx}{dt} + \underline{K} X = \underline{F} \quad (4)$$

em que:  $\underline{C}$  - representa a matriz de armazenamento

$\underline{K}$  - as matrizes de transmissividade e fenómenos de drenância,

$\underline{F}$  - é o vector de variáveis independentes,

$\underline{X}$  - é o vector das incógnitas, neste caso alturas piezométricas na água doce e água salgada.

O modelo usa elementos mistos isoparamétricos, com coeficientes funcionais para representar as propriedades geométricas do aquífero, como sejam as cotas das camadas que limitam o aquífero superior e inferiormente.

A equação (4) é integrada no tempo usando um desenvolvimento implícito de diferenças finitas, ou seja:

$$\left( \frac{\underline{C}}{\Delta t} + \underline{K}_{t+\Delta t} \right) X_{t+\Delta t} = \underline{F}_{t+\Delta t} + \frac{\underline{C}}{\Delta t} X_t \quad (5)$$

Nestas equações os índices indicam o instante em que as quantidades são calculadas. O sistema de equações não-lineares resultante é resolvido iterativamente usando um procedimento de Newton-Raphson modificado.

## EXEMPLOS DE APLICAÇÃO

### Intrusão em direcção a uma captação

Este é o tipo de problema para o qual MISA foi desenvolvido. Para ajuizar da "performance" para esta situação escolheu-se um problema que tivesse solução analítica. Assim o único que se encontrou na literatura foi o modelo desenvolvido por STRACK (1976), que no entanto só resolve situações em regime permanente usando funções de potencial de Girinskii. O problema em causa encontra-se representado em planta e corte na Figura 2. Strack considerou o aquífero infinito, para a simulação numérica escolheu-se representar apenas uma metade do aquífero, neste caso acima da linha perpendicular à costa passando pelo poço, e como não existem aquíferos infinitos apenas se considerou uma extensão de 2000 m acima da referida linha. Isto é equivalente a admitir que ao longo da costa existem poços afastados de 4000 m. Assim na solução analítica usou-se o método das imagens, BEAR (1979), com apenas uma imagem.

As simulações feitas usando MISA incluem o regime permanente sem bombagem no poço, em que portanto o caudal ambiente de 1,0m<sup>3</sup>/dia se escoia para o mar, o regime transitório para um caudal bombado de 300m<sup>3</sup>/dia e o regime permanente para este mesmo caudal. Na figura 3 apresenta-se estas situações e a comparação com a so-

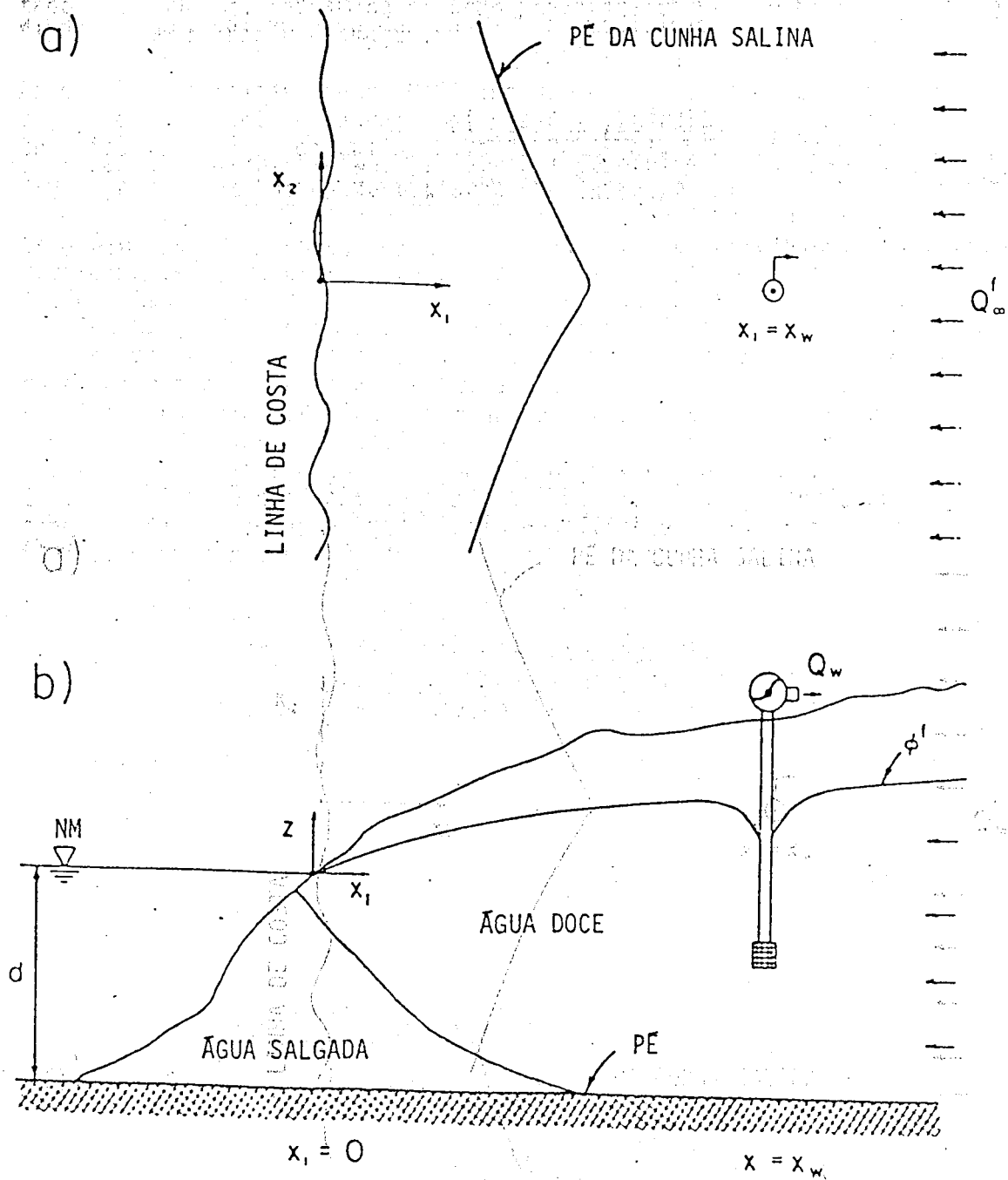


Figura 2 - Representação esquemática da intrusão salina em direcção a uma captação.

a) Planta.

b) Corte.

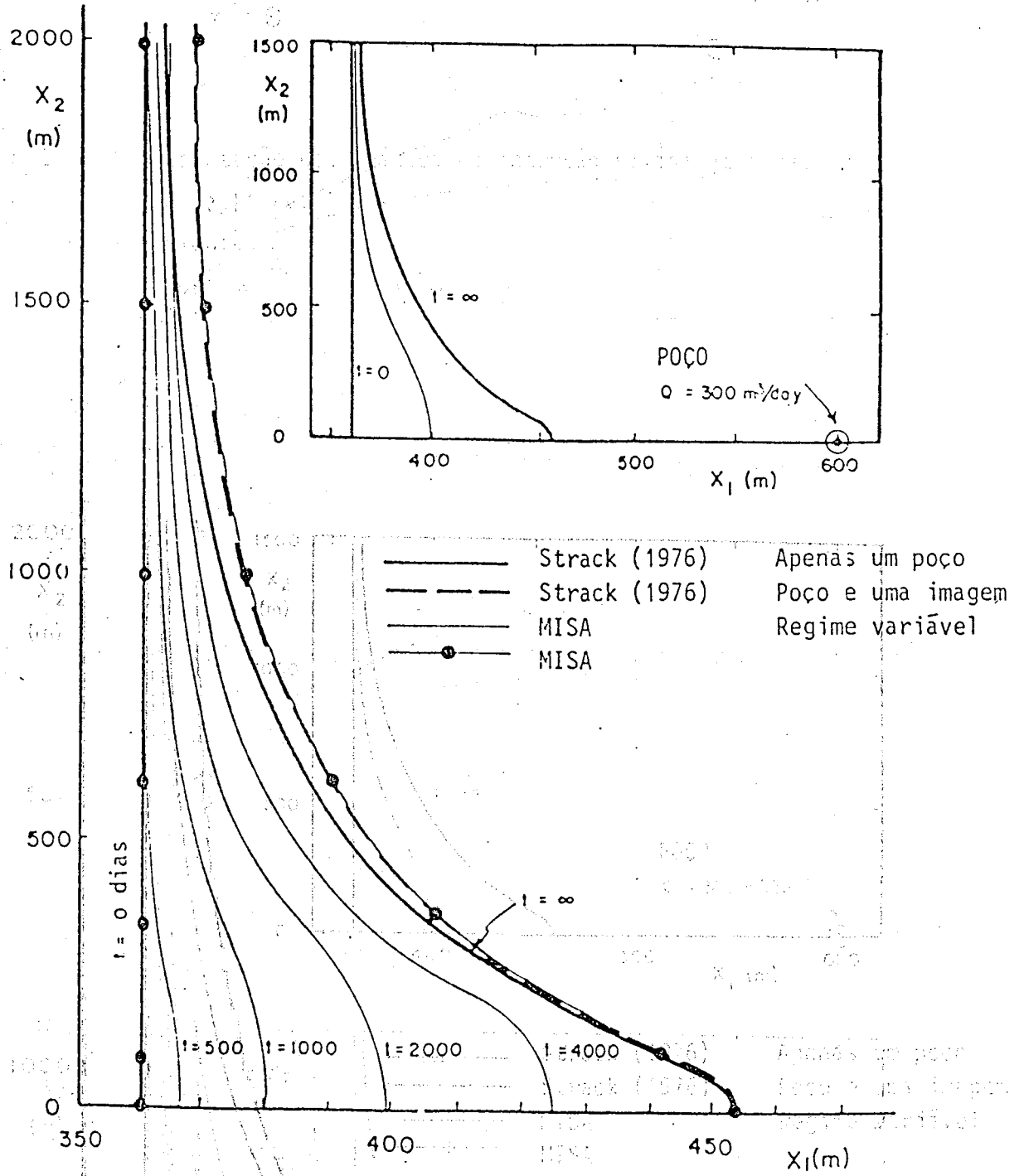


Figura 3 - Movimento do pé da cunha salina em direcção a uma captação.  
 $Q = 300 \text{ m}^3/\text{dia}$ .



lução analítica do regime permanente de Strack, com e sem método das imagens, e pode ver-se que existe uma boa coincidência entre as duas soluções. Strack considerou que não havia abertura para o mar o que não é verdadeiro justamente neste ponto que as soluções são mais discordantes pois em MISA prevê-se uma abertura pela qual o caudal não bombado se escoaria para o mar, além de que não consegue por aquela metodologia simular o regime variável que é o que existe mais frequentemente (o regime permanente deste caso leva cerca de 220 anos a atingir).

A título de curiosidade apresenta-se o resultado, do regime permanente apenas, de uma outra simulação em que se supôs que o caudal bombado era de  $400\text{m}^3/\text{dia}$ . Isto levou a que, como se pode ver nas Figuras 4 e 5 a cunha salina se sobre-elevasse debaixo do poço. Esta sobre-elevação levaria inevitavelmente, devido ao regime instável que se cria, à contaminação do poço. MISA não foi concebido para calcular esta sobre-elevação local, pois tal necessita um maior detalhe naquela zona e um modelo que estude o problema a 3 dimensões ou no plano vertical e não no plano horizontal, como é o caso deste modelo. No entanto pelo exame da Figura 5 pode concluir-se que a simulação da sobre-elevação é bastante aceitável.

### Aplicações a situações reais

MISA foi um modelo desenvolvido tendo em vista a aplicação a situações reais e como tal tem sido aplicado pelo autor ou por outros utilizadores. Nesta comunicação apresenta-se sumariamente duas das aplicações, uma das quais se encontra ainda em fase de exploração à data da escrita da comunicação.

Assim, uma primeira versão de MISA, também desenvolvida pelo autor, e que foi denominada SWIM, SeaWater Intrusion Model, foi aplicada à ilha de Martha's Vineyard ao sul do estado de Massachusetts nos Estados Unidos da América do Norte. A hidrogeologia desta ilha, é apresentada por WILSON e SÁ DA COSTA (1980).

Com este estudo conseguiu-se uma quase perfeita coincidência entre os níveis piezométricos observados e os calculados usando SWIM. Neste estudo este modelo foi na fase final usado para, depois de devidamente calibrado, definir políticas de exploração dos recursos hídricos subterrâneos e as respectivas consequências, principalmente no que respeita à intrusão salina. Mas teve um papel primordial na confirmação da estrutura geológica de profundidade pois só se dispunha de uma sondagem profunda, 240m, no centro da ilha e de ensaios geofísicos e sismológicos que avançavam certas hipóteses que em certa medida eram contraditórias. Com o uso de SWIM e baseados em ensaios de bombagens efectuados anteriormente e das observações passadas das alturas piezométricas foi possível estabelecer o posicionamento do chamado "bedrock" impermeável sem ser necessário a execução de sondagens profundas adicionais, que são muitíssimo mais onerosas que a exploração do modelo. Com esta utilização ficou demonstrado mais uma faceta deste modelo, além da de previsão, e que é a de ferramenta para ser usada anteriormente e simultaneamente com as campanhas de campo para testar e verificar hipóteses de constituição e funcionamento de aquíferos costeiros.

A outra aplicação a que se faz referência é a da aplicação de MISA ao aquífero das dunas de Vila Real de Santo António no Algarve, província do Sul de Portugal de grande impacto do ponto de vista turístico. O aquífero em estudo é de pequena extensão, cerca de  $10\text{km}^2$ , sendo a sua constituição geológica basicamente formada por camadas de areia e seixo com uma espessura variável entre 10 e 20m. Este aquífero é a única origem de água para uma população de cerca de 15 000 habitantes em época baixa e cerca de 35 000 em época estival. Como a recarga anual é relativamente baixa, 30 a 80mm, a sobre-exploração deste aquífero põe problemas graves de intrusão salina. A Direcção Geral de Recursos e Aproveitamentos Hidráulicos, de Portugal, ciente deste problema resolveu estudá-lo, estudo que ainda está em curso não sendo possível ainda apresentar uma análise final de várias situações críticas de exploração e suas consequências.

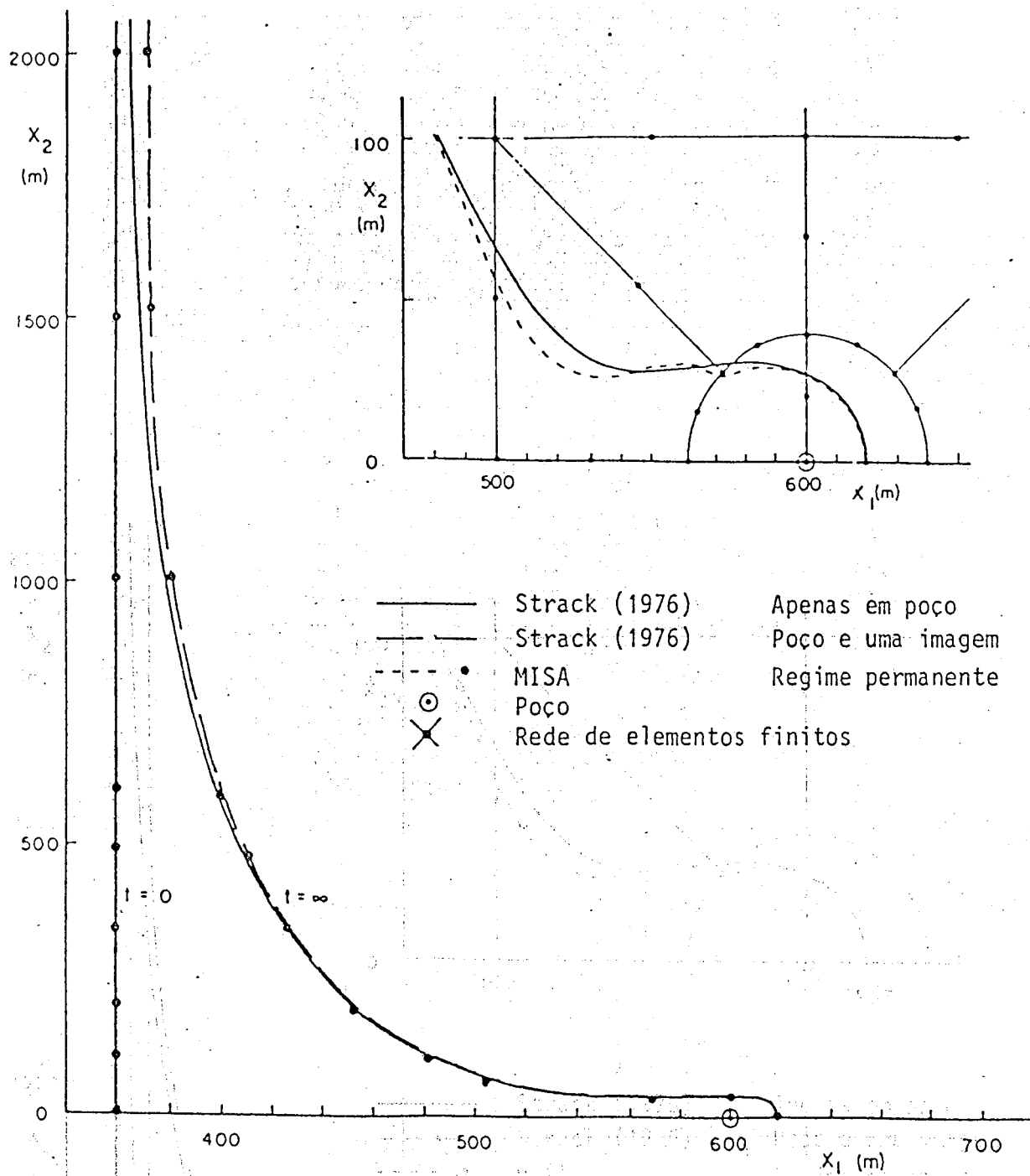


Figura 4 - Movimento do pé da cunha salina em direcção a uma captação.

$Q = 400 \text{ m}^3 \text{ 3 dia.}$

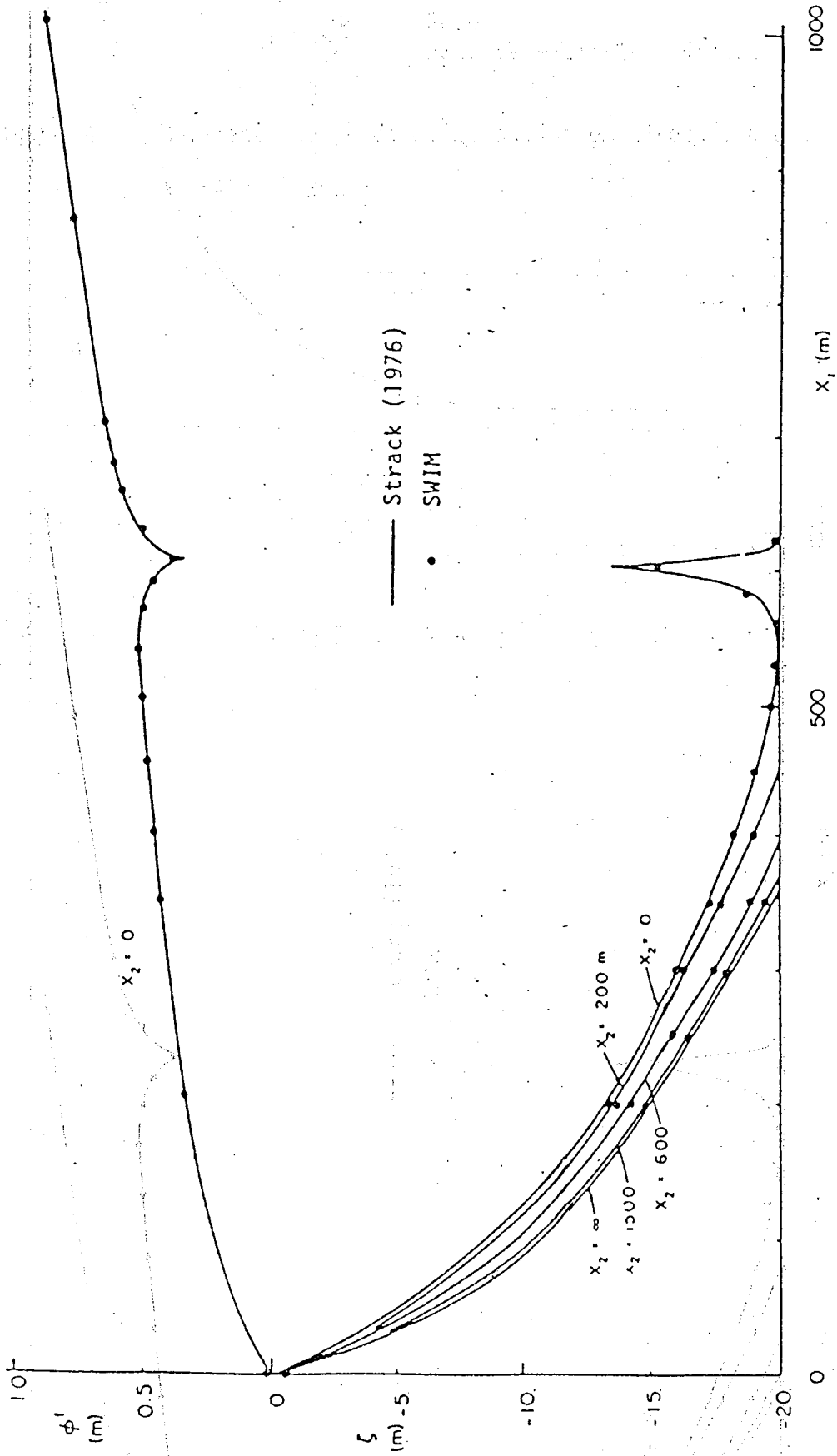


Figura 5 — Posição da interface ( $\zeta$ ) e da altura piezométrica ( $\phi^f$ ) no regime permanente do problema da intrusão salina para uma capturação  $Q = 400$  em direção a uma capturação.  $Q = 400 \text{ m}^3 \text{ dia}$ .

NOTA: As escalas verticais de  $\zeta$  e  $\phi^f$  são diferentes.

A intrusão da cunha salina ao longo das costas e sob ilhas é um resultado típico da exploração da água subterrânea nestas zonas. À escala regional os efeitos verticais, como seja a mistura e dispersão entre a água doce e salgada e escoamento vertical é frequentemente desprezável, e um modelo a duas dimensões no plano horizontal considerando a água doce e salgada separadas por uma interface imiscível é perfeitamente aceitável.

A interface pode apresentar dois aspectos distintos: a interface intersecta o fundo do aquífero definindo um "pê da cunha salina", ou a interface nunca encontra o fundo do aquífero e a massa de água doce tem a forma de uma lente fluando sob água salgada. Esta comunicação apresenta um modelo daquele tipo capaz de simular estas situações precisa e eficazmente.

MISA (Modelo de Intrusão Salina em Aquíferos) é o seu nome e foi concebido para simular escoamentos regionais em aquíferos costeiros e sob ilhas. Usa o método dos elementos finitos com a aproximação de Galerkin para a discretização no espaço, com elementos isoparamétricos mistos de 4 a 8 nós. O aquífero pode ser homogêneo ou não-homogêneo, isotrópico ou anisotrópico, ter ou não fenómenos de drenância (leakage), e ser freático ou confinado. Pode ainda ter condições fronteiras dependentes do tempo e tanto calcula soluções em regime permanente como em regime transitório.

No desenvolvimento de MISA pôs-se cuidado especial no algoritmo para calcular o deslocamento do "pê da cunha" salina. Este algoritmo usa uma rede de elementos finitos fixa servindo-se dos pontos da quadratura de Gauss e uma lei de variação da condutividade hidráulica. Esta técnica pode representar tanto o pê na base como no topo da cunha salina. MISA também pode simular eficazmente casos em que o referido "pê da cunha salina" não existe.

MISA foi aplicado a várias situações teóricas de que apenas se apresentou aqui o problema da intrusão salina em direcção a uma captação. Este modelo foi aplicado à ilha de Martha's Vineyard na costa dos E.U.A., ao aquífero de Cape Cod, E.U.A., ao aquífero do Delta do Nilo no Egipto, à ilha de Guam, na costa da Ásia, e em Israel. Actualmente está ainda em curso uma aplicação no sul de Portugal.

MISA nas aplicações apresentadas e em outras, provou ser um modelo preciso e bastante eficiente para os problemas de intrusão salina em aquíferos, em especial nos casos em que existe um "pê da cunha salina". O modelo mostrou-se ainda capaz de representar relativamente bem os efeitos de sobrelevação da cunha e provou que a hipótese de Ghyben-Herzberg não é válida para problemas em regime variável e que a profundidade do aquífero também é importante para aquele regime. Também demonstrou que as linearizações bastantes vezes usadas em soluções analíticas são também origem adicional de erros.

BIBLIOGRAFIA

- BEAR, J., Hydraulics of Groundwater, McGraw-Hill Book Company New York, 1979.
- BEAR, J. e DAGAN, G., "Some Exact Solutions of Interface Problems by Means of the Hodograph Method", J. of Geophysical Research, 6(8), 1563-1572, 1964a.
- PINDER, G.F. e PAGE, R.H., "Finite Element Simulation of Salt Water Intrusion on the South Fork of Long Island", presented at the International Conference in Finite Elements in Water Resources Princeton, 1976.
- SÁ DA COSTA, A.A.G. e WILSON, J.L., "A Numerical Model of Seawater Intrusion in Aquifers", Technical Report 247, R.M. Parsons Laboratory for Water Resources and Hydrodynamics, MIT, Cambridge, 1979.
- STRACK, O.D.L. "Single Potential Solution for Regional Interface Problems in Coastal Aquifers", Water Resources Research, 12(6), 1165-1174, 1976.
- WILSON, J.L. e A.A.G. SÁ DA COSTA, "Groundwater Hidrology of Martha's Vineyard Island", In Proceedings of the Conference on Geotechnology of Massachusetts, Boston, Março 1980.