

# PROFUNDIDADE DE FECHAMENTO E PERFIL DE EQUILÍBRIO DE PRAIA UM ESTUDO DE CASO EM SAND KEY, FLORIDA <sup>1</sup>

Ping Wang

Universidade do Sul da Flórida, EUA  
pwang@cas.usf.edu

Richard A. Davis, Jr.

Universidade do Sul da Flórida, EUA  
davis@chuma.cas.usf.edu

## RESUMO

A presente pesquisa foi realizada a partir da análise de quinhentos e cinquenta e cinco perfis de praia, realizados no campo durante o intervalo de 5 anos, ao longo dos 20 km de extensão da ilha-barreira 'Sand Key', localizada na costa oeste central da Flórida (Golfo do México). Os perfis foram analisados com o objetivo de compreensão das características regionais de profundidade de fechamento e perfil de equilíbrio de praia. Usando uma média de 6 anos do comportamento de condições extremas de ondas para um intervalo de 12 horas obtidas em uma estação "WIS" ("Sistema de Informação de Ondas", desenvolvido pelo "Army Corps of Engineers", EUA) e aplicadas à fórmula de Birkemeier (1985), foi possível reproduzir em boas condições a profundidade de fechamento na parte norte da área de estudo (sem o controle direto do fundo rígido), enquanto o uso da fórmula de Hallermeier (1978, 1981) ultrapassou bastante o valor obtido nos levantamentos de campo.

**Palavras-chave :** perfis de praia, perfis de equilíbrio, modelização de perfis de equilíbrio, profundidade de fechamento, transporte sedimentar litorâneo, costa da Flórida

## ABSTRACT

Five hundred and fifty-five beach profiles surveyed during 5 years (3 years for the Indian Shores) along the 20-km beach at Sand Key, west-central Florida were analyzed to understand the regional characteristics of closure depth and equilibrium beach profile. Using a 6-yr average of 12-hr extreme wave conditions obtained from a local WIS station, the Birkemeier (1985) formula reproduced the measured closure depth at the northern part of the study area (without the direct control of the hard bottom) well, whereas the Hallermeier (1978, 1981) formula significantly over-predicted the measured value.

**Key Words:** Beach profiles, equilibrium profiles, beach profile models, depth of closure, cross-shore sediment transport, Florida Gulf coast.

---

## Introdução

A quantificação da profundidade de fechamento e de perfis de equilíbrio de praia faz parte de inúmeros estudos de engenharia costeira e morfologia litorânea. Por exemplo, a profundidade de fechamento é necessária no processo de alimentação artificial de praias, e também no uso de modelos morfológicos ou de transporte de sedimentos, representando o elemento de separação entre a zona de transporte ativo de sedimentos e a zona mais profunda onde ocorre baixa taxa de sedimentação e erosão. Uma refinada definição de profundidade de fechamento, enfatizando o significado da escala temporal, foi proposto por Kraus et al. (1999), que afirmaram que "a profundidade de fechamento para um dado ou característico intervalo de tempo é definida como a profundidade no meio litorâneo submerso mais próximo da faixa de praia na qual não existe significativa mudança na batimetria nem tampouco ocorre uma troca importante de sedimentos entre o setor litorâneo e o segmento offshore." Hallermeier (1977, 1978, 1981, 1983) desenvolveu um procedimento para empiricamente prever a profundidade de fechamento usando condições extremas de ondas, baseado sobretudo em dados de laboratório e em algumas medidas de campo, na costa do Pacífico e do Golfo do México. A profundidade de fechamento foi determinada a partir de

sucessivas medições de batimetria e perfis de praia (e.g., Kraus and Harikai 1983; Birkemeier 1985) em um dado período de tempo.

Uma equação genérica que expressa a forma do perfil de equilíbrio de praia foi originalmente proposta por Bruun (1954), baseada em perfis de praia relativos à costa dinamarquesa (Mar do Norte) e à costa da Califórnia (Mission bay). Usando dados de perfis elaborados para a costa atlântica dos Estados Unidos e a costa do Golfo do México, Dean (1977) obteve uma equação semelhante:

$$h = Ax^m \quad (1)$$

onde  $h$  é a batimetria,  $x$  é a distância horizontal da linha de costa,  $A$  é um parâmetro dimensional determinado sobretudo pelo diâmetro do sedimento; o coeficiente empírico  $m$  foi definido com sendo da ordem média de  $2/3$ . Modificações na equação geral foram propostas para melhor indicar a profundidade calculada nas proximidades da linha de costa (Larson 1988; Larson and Kraus 1989; Dean 1991), e para incluir a influência de variações de granulometria nos sedimentos (Larson 1991; Work and Dean 1991; Moutzouris 1991). Foi demonstrado que a Equação 1 com  $m = 2/3$  é consistente com a dissipação uniforme da energia da onda por unidade de volume na zona de arrebentação (Dean 1977). A relação entre o parâmetro dimensional,  $A$ , e a granulometria do sedimento, foi examinada por Moore (1982) e Dean (1987).

Utilizando os mesmos dados (504 perfis de praia) da análise de Dean (1977), Bodge (1992) propôs uma função exponencial:

$$h = B(1 - e^{-kx}) \quad (2)$$

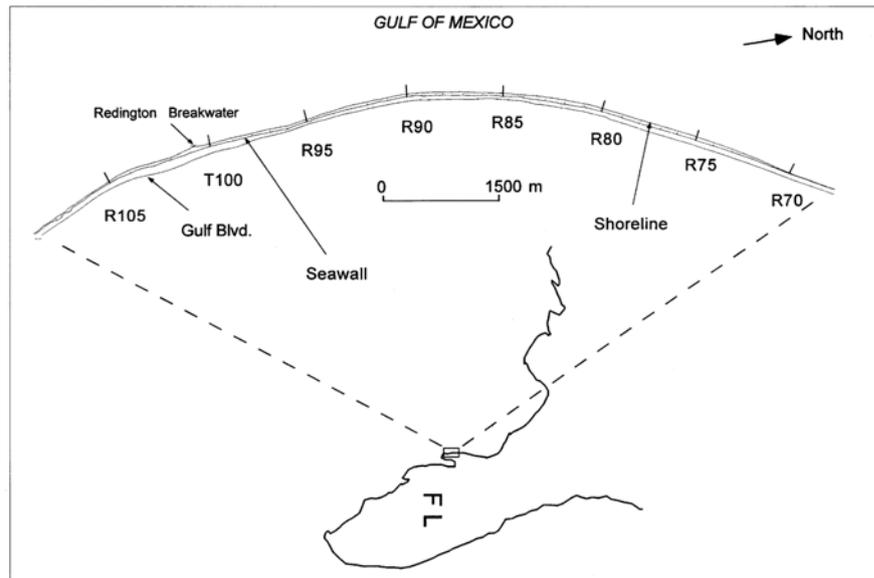
onde  $B$  e  $k$  são coeficientes dimensionais empíricos. Bodge (1992) concluiu que a maior parte dos perfis de praia (60% a 71%) se adequaram melhor pela função exponencial do que pela função de poder (Eq. 1) de Bruun (1954) e Dean (1977). Melhor adequação na função exponencial foi também encontrada por Komar e McDougal (1994), que usaram um perfil de praia no delta do Rio Nilo. O coeficiente  $B$  determina a máxima profundidade na água e  $k$  controla a curvatura do perfil calculado.

No presente estudo, 555 perfis de praia ao longo dos 20 km de extensão da ilha-barreira “Sand Key”, na costa oeste (Golfo do México) da Flórida, foram examinados. A profundidade de fechamento e a tendência a mudanças de valores provocadas por afloramentos do substrato marinho rochoso foram discutidas. As características do perfil médio foram consideradas, assim como foram utilizadas fórmulas e equações para reconstruir o perfil médio de praia. O objetivo do estudo foi analisar um elevado número de perfis de praia coletados em um setor espacialmente reduzido, no intervalo de 5 anos, para determinar as características da profundidade de fechamento e do perfil de equilíbrio de praia.

### *Dados de Campo*

A ilha-barreira “Sand Key” acha-se localizada adjacente à uma ampla ponta litorânea rochosa, formada por calcários miocênicos (calcáreo Tampa), o qual se apresenta exposto ao longo do canal de navegação em “Indian Rocks” (Figura 1). Em razão das características geológicas e da topografia, Sand Key apresenta uma larga variedade de direções da linha de costa, de nordeste para sudoeste, com diferenças de quase 60 graus. A altura média significativa das ondas ao longo desse litoral é da ordem de 0.3m (Tanner 1960; Gibeaut 1991). A mesma altura foi obtida a partir de mensurações durante 83 dias descontínuos pelo Serviço Geológico Americano (« U.S. Geological Survey –USGS»), com medidores instalados a aproximadamente 150m offshore em relação ao perfil R75, durante o período de 1991 a 1992. O medidor do USGS passou por frequentes dificuldades técnicas, o que pode ter distorcido as mensurações no sentido de criar situações de baixa energia de onda sob condições meteorológicas de calmaria (sem tempestades). Dados oriundos de um medidor digital situado próximo do local de estudo,

controlado pelo organismo ‘Army Corps of Engineers’, indicam, com média estabelecida a partir de 6 anos de medições, uma altura média significativa da ordem de 0.4m, com período da ordem de 3.9 s. Ondas de maior dimensão são tipicamente geradas durante a passagem de sistemas frontais no inverno e de furacões no verão. A amplitude de maré na área de estudo é baixa, da ordem de 0.8m.



**Figura 1:** Área de estudo. Ilha-barreira “Sand Key”, costa oeste (Golfo do México) da Flórida, EUA. Praias Indian Rocks (R70-R84), Indian Shores (R85-R98) e Redington (R99-R109). “Gulf Blvd” – Boulevard do Golfo; “Seawall” – muro de contenção; “shoreline” – linha de costa.

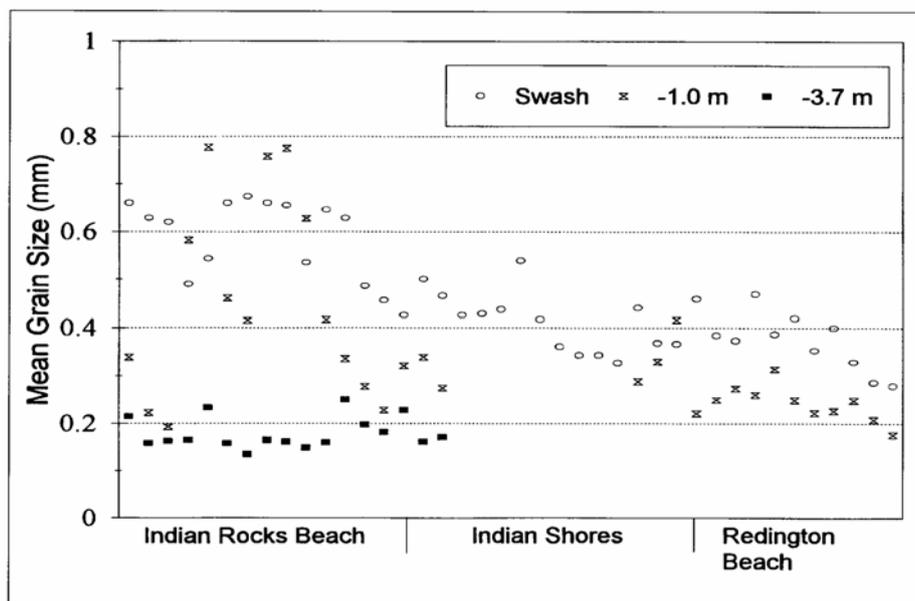
Foram realizados perfis no campo, com intervalos definidos de coleta de dados, para o monitoramento de três projetos de alimentação artificial de praia (Davis et al. 1999b) situados nas adjacências da área de pesquisa. A fase I (Praia Redington, R99-R109), foi finalizada em 1988; a fase II (Praia Indian Rocks. R72-R84), foi finalizada em 1990; a fase fase III (Praia Indian Shores, R85-R98), foi finalizada em 1992. A Praia Redington foi monitorada de 1988 a 1992 através do acompanhamento de 20 perfis. A Praia Indian Rock foi monitorada de 1990 a 1992, em 34 diferentes pontos. Os perfis de praia situaram-se a 150m desse dois projetos de alimentação artificial de praia. De 1992 a 1995, os três projetos foram monitorados através do estabelecimento de 40 perfis com 300 m de distância entre eles. Os dados obtidos desses perfis acham-se sintetizados na tabela 1. Esses perfis foram realizados antes e até seis meses após o término da alimentação das praias: noventa e três por cento dos perfis foram realizados após o término da alimentação, e 7% , antes do início das atividades de alimentação artificial da praia.

**Tabela 1:** Sumário dos dados de perfis de Praia

| Localização        | Tempo     | No. de perfis | No. de Perfil |               |
|--------------------|-----------|---------------|---------------|---------------|
|                    |           |               | Monitoramento | Distância (m) |
| Redington Beach    | 1990-1992 | 20            | 3             | 150           |
| Indian Rocks Beach | 1990-1992 | 34*           | 7             | 150           |
| Sand Key Beaches   | 1992-1995 | 40            | 6             | 300           |

Os sedimentos na área de estudo são do tipo bimodal, tanto no que diz respeito à granulometria quanto à composição (Davis et al. 1999a). Areias quartzosas, aproximadamente com 0.1 a 0.2 mm de

diâmetro, assim como cascalho e areia grosseira biogênica formada por fragmentos de conchas, dominam na área. A granulometria média dos sedimentos é fortemente influenciada pelos fragmentos de conchas. A percentagem típica de cascalho biogênico é da ordem de 10-15% para as praias naturais, e geralmente superior no material de empréstimo utilizado para alimentação artificial das praias. Essa maior granulometria dos fragmentos de conchas resulta em praias artificiais com sedimentos mais grosseiros, quando comparados às praias naturais, sendo a Praia Indian Rocks a que apresenta mais material grosseiro e a Praia Indian Shores, a que apresenta material mais fino (Davis et al. 1999b). Quatro amostras de sedimentos, sendo uma do berma, outro da zona de 'swash', uma a aproximadamente 1 m de profundidade na água e outra a 3,7 m de profundidade, foram coletadas na maior parte dos perfis de praia trabalhados durante os dois primeiros anos de monitoramento. A área de "swash" e berma são geralmente compostas por sedimentos grosseiros (material artificial) e apresentam grande variação na granulometria dos sedimentos, quando comparado com os sedimentos coletados no ambiente litorâneo submerso (Figura 2). As amostras de -3.7 m indicaram uma maior uniformidade na granulometria dos sedimentos, especialmente na Praia Indian Rocks, sendo o material dominado por areias quartzosas finas com pequena quantidade de cascalho biogênico.



**Figura 2:** Granulometria dos sedimentos ao longo dos 20 km de extensão da ilha-barreira Sand Key. O tamanho dos grãos corresponde a médias obtidas de entre 4 a 27 amostras coletadas para cada praia no período compreendido entre 1990 e 1993. Na vertical : média granulométrica. Na horizontal : localidades pesquiadas.

Treze trabalhos de monitoramento em campo foram realizados em 17 localidades na Praia Indian Rocks durante 5 anos, de 1990 a 1995. A maior parte da Praia Redington contou com 9 monitoramentos de campo durante 5 anos, e a Praia Indian Shores, com 6 monitoramentos durante 3 anos, de 1992 a 1995 (Tabela 1). O intervalo de tempo entre medições no campo situou-se entre 3 meses e 1 ano, e as elevações dos perfis foram realizadas com referência ao Datum Vertical Geodésico Nacional (NGVD). O zero NGVD situa-se aproximadamente 0.2 m abaixo do nível médio do mar (MWL), sendo aproximadamente igual ao baixo nível do mar (MLW) na área de estudo.

Os perfis de praia monitorados em campo foram realizados a partir do uso de uma estação eletrônica total (SOKKIA Set 4). As medições foram realizadas em dois segmentos. Os perfis de praia na área emersa e até a profundidade de -1.5 m foram monitorados usando a elevação padrão NGVD. Os perfis offshore, tipicamente de -1.2 m a -4.6 m NGVD (acima de -6.1 m no segmento norte de Sand Key e -4.3 m no segmento sul), foram monitorados através do uso de um trenó marinho, modificado a partir do

usado pelo ‘Army Corps of Engineers’. Uma superposição vertical de 0.3 m foi usada para combinar os resultados obtidos na faixa de praia com os dados de offshore. Kraus e Heilman (1998) determinaram que o erro vertical na elevação produzido por um trenó marinho é da ordem de 0.8 cm para distâncias de 10 a 1000 m. Em raras ocasiões (probabilidade menor que 1% ), o erro pode ser superior a 2.5 cm.

### *Profundidade de Fechamento*

A profundidade de fechamento corresponde à área que separa a zona ativa de transporte de sedimento no segmento litorâneo submerso adjacente à praia, da área mais profunda onde ocorre reduzida deposição e erosão durante um certo intervalo de tempo (Kraus et al. 1999). Tal área pode ser determinada sob duas perspectivas. A primeira utiliza medições, realizadas em campo através da produção de perfis de praia em sequências temporais, dos padrões típicos de comportamento e da magnitude das mudanças ocorridas ao longo dessa escala temporal (e.g., Birkemeier 1985; Larson and Kraus 1994). O segundo corresponde à um cálculo empírico, mais desenvolvido a partir de dados coletados no campo, utilizando condições de ondas extremas (e.g., Hallermeier 1978, 1981) ou a altura média significativa anual obtidas através de medidores de onda (Houston 1995). O presente estudo foi realizado nos termos da primeira abordagem, contando ainda com larga disponibilidade de dados offshore; na sequência, foi realizada uma comparação com resultados obtidos a partir da adoção do segundo método, isto é, através do uso de equações. Também foram examinadas as tendências de mudanças na profundidade de fechamento influenciadas pelos afloramento de fundo rochoso rígido ao longo dos 20 km de extensão da área estudada.

### *Determinação da Profundidade de Fechamento*

Como foi enfatizado por Kraus et al. (1999), a determinação da profundidade de fechamento é significativamente influenciada por escalas temporais e espaciais. Grandes escalas temporais tendem a resultar em maiores profundidades de fechamento (Birkemeier 1985). Variações sazonais no clima de ondas e padrões de mudanças de perfis de praia também produzem mudanças de profundidade nos segmentos litorâneos mais próximos da praia (Larson e Kraus, 1994; Kraus et al. 1999). Uma seleção apropriada de escalas temporais e espaciais para práticas de engenharia mostra-se portanto essencial na definição e aplicação da profundidade de fechamento. No presente estudo, a profundidade de fechamento foi determinada a partir da comparação de dados de perfis de campo, com medições realizadas durante 5 anos em Redington e Indian Rocks, e 3 anos em Indian Shores. Ainda que essa escala temporal seja menor do que aquela obtida a partir de medições realizadas durante 7 anos nas áreas de alimentação artificial de praias adjacentes à área de estudo (Davis et al. 1999b), os valores de profundidade de fechamento não apresentaram diferenças significativas entre ambos os dados. A comparação entre estudos anteriores de medições offshore (não utilizando trenó marinho) na Praia Redington (Dean e Lin, 1990) apoia esse fato. O objetivo foi estabelecer uma profundidade de fechamento confiável, através da realização de sucessivos perfis de praia no campo, além da análise das tendências de alterações, ao longo de toda a extensão da área estudada, a qual é substancialmente influenciada por afloramentos de rochas consolidadas no assoalho litorâneo.

Um exemplo de 13 perfis sucessivos realizados em campo em Indian Rocks é apresentado na Figura 3A. A linha pontilhada representa o perfil de praia antes da alimentação artificial, as demais 12 linhas representam perfis realizados após a alimentação artificial. Embora o perfil tenha sido significativamente alterado após o processo de alimentação artificial da praia, não houve mudanças importantes na elevação dos perfis medidos além de -4.6 m NGVD. Essa profundidade foi determinada como sendo a profundidade de fechamento, abaixo da qual não foram verificadas sedimentação e/ou erosão significativa durante os 5 anos de medições. As mudanças de elevação indicadas pelo desvio padrão em relação à mediana (STD) foram plotados em comparação com a elevação média obtida nos perfis (Figura 3B). Os perfis pré-alimentação artificial não foram incluídos no cálculo do STD, em razão das importantes modificações produzidas pela alimentação artificial. A larga variação na batimetria próximo da praia (“nearshore area”),

de -1 a 1 m, foi produzida pelo processo de erosão da linha de costa após a alimentação artificial. O baixo STD, em torno de -1.5 m, indica condições de relativa estabilidade, especialmente nos segmentos mais próximo da praia. O valor -4.6 m indica a localização da profundidade de fechamento.

A Figura 4 mostra um exemplo típico das condições presentes em Indian Shores. Dois monitoramentos em campo foram realizados antes da alimentação artificial (linha pontilhada). No segmento mais próximo da costa, foram observadas grandes variações nas elevações, como indicadas pelo maior STD próximo da linha de costa, porém com pequenas mudanças no sistema de depressão e barra litorânea. A profundidade de fechamento foi aí determinada com da ordem de -4.0 m. Não foram medidas erosão ou sedimentação importantes além da profundidade de fechamento de -4.0 m durante os 3 anos de medições, apesar da considerável alimentação artificial realizada na praia e na zona litorânea submersa adjacente nesse segmento de estudo.

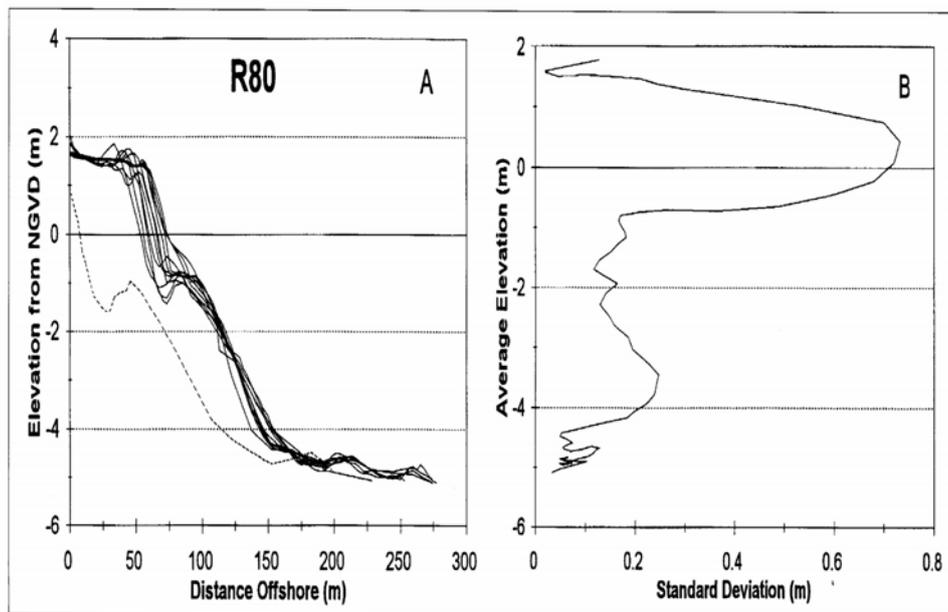


Figura 3: Perfis na localidade R80 (Indian Rocks). A) 13 sucessivos monitoramentos em campo, com a linha pontilhada mostrando o perfil pré-alimentação artificial (na vertical, elevação tomada a partir do NGVD; na horizontal, distância offshore); B) desvio padrão na variação da elevação (na vertical, média de elevação, na horizontal, desvio padrão em metros).

Em Redington, foram observadas grandes variações na batimetria nas proximidades da linha de costa (Figura 5). As mudanças no sistema de depressão e barra (“bar and trough”: Davis e Fitzgerald, 2004) não foram tão evidentes como em Indian Rocks, em função do relevo relativamente plano da barra litorânea. A profundidade de fechamento foi definida como da ordem de -3.0 m NGVD. O aumento da batimetria offshore ao final dos perfis (Figuras 4 e 5) foi causada por afloramentos irregulares do substrato rochoso consolidado. Os sucessivos monitoramentos em campo refizeram a mesma linha, mas não os mesmos pontos de medições.

#### *Tendências das Alterações da Profundidade de Fechamento*

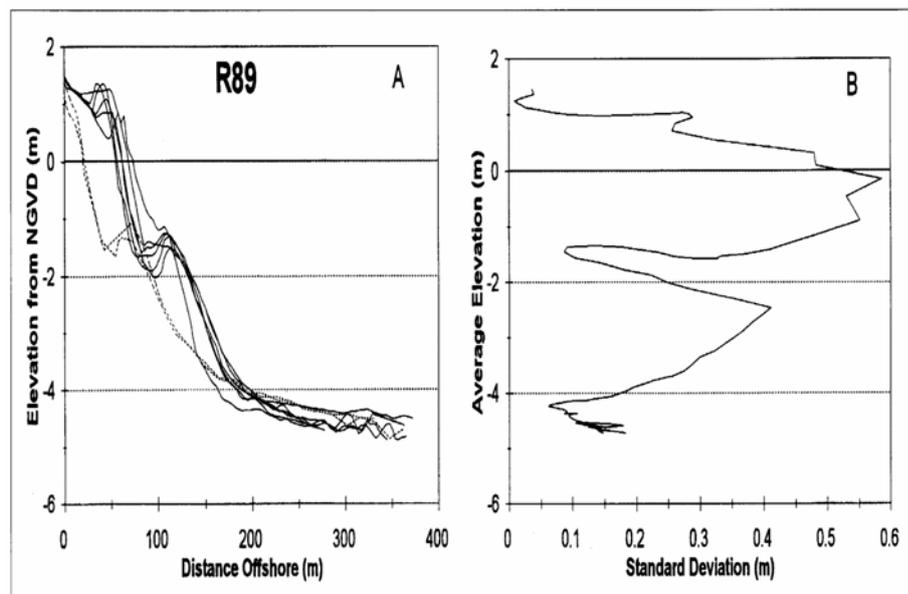
A profundidade de fechamento obtida nos 40 perfis realizados em Sand Key foi determinada a partir da monitoramento sucessivo dos perfis, variando entre 6 e 13 medições, durante o período 1990 e 1995. Uma tendência de decréscimo da profundidade de fechamento em direção ao sul foi verificada na parte meridional da área de estudo (Figura 6). No segmento setentrional (perfis R70 a R78), a profundidade de fechamento permaneceu constante, em torno de -4.9 m. A profundidade de fechamento diminuiu para -3.0

m no segmento final, ao sul, representando um decréscimo da ordem de 38%. Ao sul do perfil R78, foi observada a ocorrência de um decréscimo linear. A tendência de decréscimo pode ser expressa como

$$D_c = 4.54 - 0.00018Y_{R78} \quad (3)$$

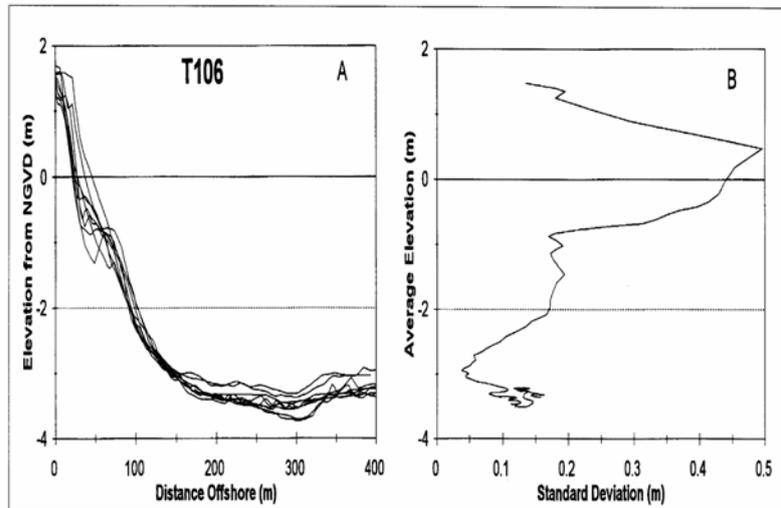
onde  $D_c$  é a profundidade de fechamento em metros, e  $Y_{R78}$ , a distância (m) para sul, a partir do perfil R78. O coeficiente de correlação  $R^2$  foi definido como 0.83. A norte do perfil R78, a profundidade de fechamento permanece aproximadamente em torno de -4.9 m, sem indicação de qualquer tipo de tendência.

Uma batimetria horizontalizada foi observada nos segmentos offshore de todos os perfis. Esse fundo rígido regional é controlado pela ocorrência do calcáreo mioceno Tampa. No segmento setentrional de Sand Key, entre os perfis R70 e R78, o fundo horizontalizado (Figura 7A) acha-se exposto entre -6.1 m e -5.2 m abaixo do NGVD. A relativamente uniforme profundidade de fechamento, que é da ordem de -4.9 m, acha-se entre 1.2 a 0.3 m acima do afloramento rochoso. No segmento meridional, no entanto, o fundo rígido acha-se exposto a -3.0 m NGVD (Figura 7B). A profundidade de fechamento de -3.0 m determinada a partir das sucessivas medições de campo acha-se controlada pela exposição do fundo rígido. A profundidade da plataforma horizontalizada diminui de norte para sul, controlando assim a tendência de alteração da profundidade de fechamento.



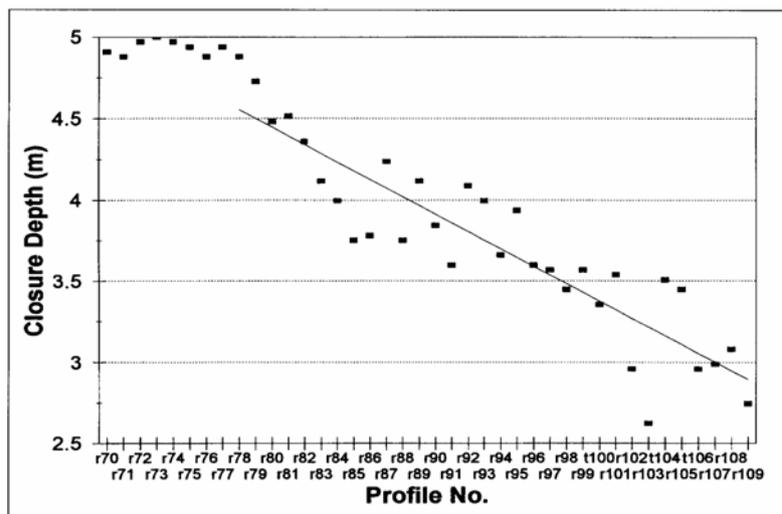
**Figura 4:** Perfil Indian Shores (R89). A) 8 sucessivos monitoramentos em campo, com a linha pontilhada mostrando os perfis pré-alimentação superficial da praia (na vertical, elevação tomada a partir do NGVD; na horizontal, distância offshore); B) desvio padrão na variação de elevação (na vertical, média da elevação em metros; na horizontal, desvio padrão em metros).

No perfil R78, o fundo rígido apresenta-se 0.3 m mais profundo do que a profundidade de fechamento (Figura 8A). Trezentos metros ao sul, no perfil R79, a profundidade de fechamento é quase a mesma da profundidade do fundo rígido (Figura 8B). É possível então considerar que o decréscimo linear da profundidade de fechamento ao sul do perfil R78 é controlada primariamente pela elevação do fundo rígido horizontalizado, e não pela energia das ondas extremas. Por outro lado, a profundidade de fechamento uniforme ao norte do perfil R78 parece ser principalmente controlada pelo clima de ondas. Não foram encontradas evidências de sistemas de correntes nesse trecho de costa, que é do tipo micro-maré, fato que poderia significativamente influenciar o transporte de sedimentos na área litorânea submersa, assim como a profundidade de fechamento (Davis 1997).



**Figura 5:** Perfil Rendigton (T106). A) 9 sucessivos monitoramentos em campo, após a alimentação superficial da praia (na vertical, elevação tomada a partir do NGVD; na horizontal, a distância offshore); B) desvio padrão na variação de elevação (na vertical, média da elevação em metros; na horizontal, desvio padrão em metros).

Em síntese, a profundidade de fechamento, definida aqui como a profundidade mais próxima da linha de costa na qual não ocorreram importantes mudanças na topografia do fundo litorâneo durante o período de mensuração estabelecida (5 anos para Indian Rocks e Redington, e 3 anos para Indian Shores), foi definida a partir de sucessivos monitoramentos de perfis de praia em campo. Na área onde o fundo rígido horizontalizado acha-se abaixo da profundidade de fechamento (de R70 a R78), a profundidade de fechamento foi definida como sendo da ordem de - 4.9 m abaixo do NGVD, ou seja, da ordem de - 5.1 m abaixo do MWL. Em contraste, ao longo de uma larga extensão da área de estudo, ao sul do perfil R78, a profundidade de fechamento foi largamente controlada pela elevação do fundo rígido, bem mais do que pelas condições hidrodinâmicas isoladamente. Um decréscimo linear em direção ao sul foi encontrado, também controlado pelo calcáreo mioceno Tampa. Uma compreensão adequada da geologia regional, assim como da batimetria no segmento próximo da linha de costa, mostra-se portanto essencial na determinação da profundidade de fechamento, sobretudo no segmento meridional de Sand Key.



**Figura 6:** Profundidades de fechamento determinadas a partir dos monitoramentos sucessivos, e suas tendências de mudança (na vertical, profundidade de fechamento em metros; na horizontal, número do perfil).

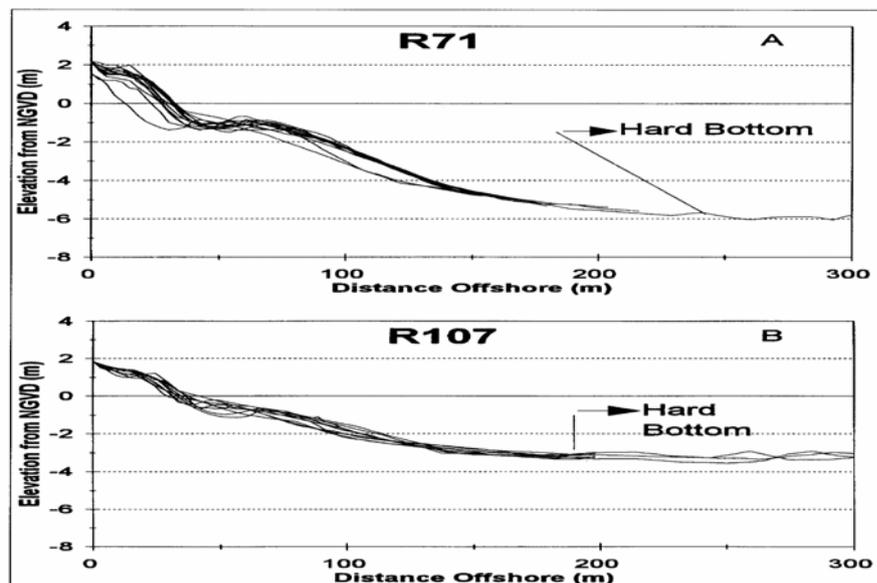
### Comparação com previsões empíricas

Em razão do forte controle realizado pelos afloramentos rochosos consolidados no fundo litorâneo ao sul do perfil R78, a previsão empírica apresentada por Hallermeier (1981), bem como equações similares (e.g., Birkemeier 1985), as quais foram desenvolvidas a partir da análise de condições de ondas extremas, não se mostram aplicáveis. Assim, os cálculos empíricos foram comparadas com as profundidades de fechamento medidas na porção norte da área de estudo, onde o fundo rígido não influencia diretamente esse limite. Uma equação, bastante utilizada, foi proposta por Hallermeier (1978, 1981), baseada sobretudo em estudos de laboratório:

$$Dc = 2.28H_{s_{12hr}} - 68.5 \left( \frac{H_{s_{12hr}}^2}{gT_{p_{12hr}}^2} \right) \quad (4)$$

onde  $H_{s_{12hr}}$  é a altura significativa das ondas que excedeu 12 horas de mensurações ao longo do ano e  $T_{p_{12hr}}$ , o período de onda associado com  $H_{s_{12hr}}$ . Baseado nos dados obtidos de dez perfis de alta resolução realizados em Duck, Carolina do Norte, Birkemeier (1985) modificou a constante da fórmula de Hallermeier nos seguintes termos:

$$Dc = 1.75H_{s_{12hr}} - 57.9 \left( \frac{H_{s_{12hr}}^2}{gT_{p_{12hr}}^2} \right) \quad (5)$$



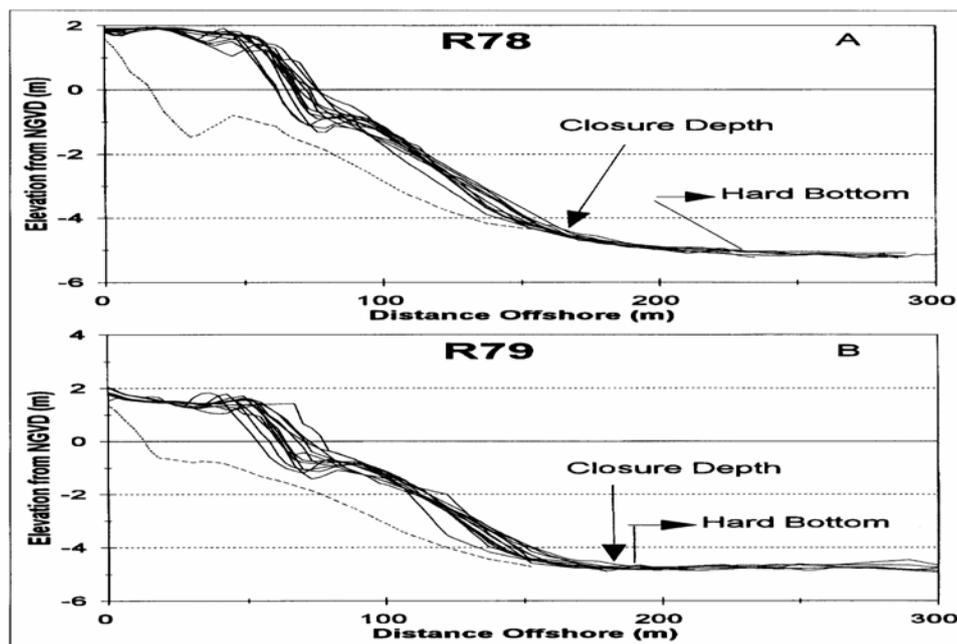
**Figura 7:** Exposição do fundo rochoso rígido. A) Perfil R71 no extremo final da parte setentrional; B) Perfil R107 no extremo final da parte meridional. Perceber a maior elevação do fundo rígido no perfil R107 (na vertical, elevação tomada a partir do NGVD; na horizontal, distância offshore).

A equação de Birkemeier resulta em aproximadamente 20% de profundidade de fechamento mais rasa do que a equação de Hallermeier, porque o primeiro termo é o principal controlador dos valores calculados. Houston (1995) simplificou a equação de Birkemeier e desenvolveu uma equação empírica usando a média anual de altura significativa de onda  $H_{s_{avg}}$

$$Dc = 6.75H_{s_{avg}} \quad (6)$$

Os dados WIS na estação offshore de Sand Key a uma profundidade de - 8 m foram compilados com o objetivo de permitir a comparação entre valores medidos e valores calculados. A média anual ( $H_{s\_avg}$ ) e a medida extrema de 12 horas ( $H_{s\_12hr}$ ) de altura significativa das ondas, associada com os picos de períodos de onda ( $T_{p\_avg}$ ,  $T_{p\_12hr}$ ), estão listados na tabela 2. A altura significativa extrema anual variou significativamente de ano para ano, como indicado pela alta percentagem (29%) do desvio padrão em torno da mediana. A média anual da altura significativa foram significativamente constantes, variando de 0.3 a 0.4 m, como também foi observado por outros estudos (Tanner 1960; Gibeaut 1991). Analisando a grande variação das condições extremas de ondas, Kraus et al. (1999) sugeriram o uso da média anual de variação de ondas para ser utilizada nas equações 4 e 5, com o objetivo de calcular a profundidade de fechamento.

Utilizando as maiores variações nas condições extremas de ondas, da ordem de 4.36 m e 12.8s, obtidas em 1995, a equação de Hallermeier (1981) levou à obtenção de uma profundidade de fechamento da ordem de -4.9 m. Um valor significativamente maior, de -6.9 m, foi obtido usando a média de 6 anos de condições extremas de ondas. A equação de Birkemeier (1985) indicou valores de -6.3 m, usando a maior condição extrema de onda, da ordem de 4.36 m. Mesmo que menor do que a previsão obtida pela equação de Hallermeier (1981), esse resultado é ainda 29% maior do que o valor obtido pelas mensurações realizadas em campo. Usando a média de 6 anos de condições extremas de ondas, como sugerido por Kraus et al. (1999), a equação de Birkemeier (1985) previu uma profundidade de fechamento da ordem de -4.8 m, bastante próxima do valor de -4.9m obtido a partir das medições de campo. Faz-se necessário salientar que ambas as fórmulas (Hallermeier, 1981 e Birkemeier, 1985) fazem referência ao nível médio do mar (MLW). Na área de estudo, o MLW é aproximadamente situado ao nível zero NGVD. A equação de Houston (1995), que usa a média anual de altura significativa de onda, resultou em um valor mais baixo, de - 2.7 m, quando comparado à profundidade de fechamento obtida a partir de medidas de campo. Na verdade, para reproduzir os valores medidos, de - 4.9 m, faz-se necessário o uso de um coeficiente bastante superior, de 12.25, ao invés de 6.75.



**Figura 8:** Profundidade de fechamento e elevação do fundo rígido. A) Perfil R78, a profundidade de fechamento acha-se acima do fundo rígido; B) Perfil R79, a profundidade de fechamento acha-se exatamente no topo do fundo rígido (na vertical: elevação tomada a partir do NGVD; na horizontal, distância offshore).

## Perfil de Equilíbrio de Praia

Cálculos de perfis médios têm sido frequentemente utilizados para verificar e calibrar equações matemáticas relacionadas à definição do perfil de equilíbrio de praias (e.g., Dean 1977; Bodge 1992). Considerando que a alimentação artificial de praias altera significativamente a forma do perfil de praia, só foram aqui utilizados para a produção desse perfil médio os perfis produzidos até 6 meses antes do início das obras de alimentação artificial, e assumindo-se que ajustamentos rápidos de perfis ocorreram. A distância horizontal foi ajustada, de forma a fazer com que todos os perfis tivessem início no nível zero NGVD. Apesar das variações locais de morfologia, tais como a localização e magnitude do sistema de depressões e bancos e também de mudanças na profundidade de fechamento, um perfil médio foi obtido com o objetivo de permitir o estudo da forma genérica do perfil de praia para a área de estudo.

Um perfil médio foi obtido a partir dos 517 perfis realizados em campo após o processo de alimentação artificial das praias, em 62 diferentes localidades, durante o período de 5 anos. Para permitir a compreensão das características do perfil médio final, todos os perfis médios foram comparados com exemplos de perfis isolados nos setores norte, central e sul de Sand Key (Figura 9). O perfil médio obtido apresenta uma forma mais lisa, concava para cima, do que os perfis isolados. Nesse perfil médio, como era esperado, o sistema de depressão e barra, que representa forma bastante comum ao longo dos 20 km de extensão da área de estudo, mostrou-se significativamente reduzido (Figura 9). Grandes variações (30% a 40% do valor médio das elevações) foram encontradas durante o cálculo da média na porção próxima da linha de costa, refletindo uma natureza mais dinâmica da morfologia nesse segmento litorâneo submerso. A morfologia quase horizontal na profundidade de - 4.1 m é controlada pela presença do fundo rígido. A profundidade do fundo rígido decresce do norte de Indian Rocks para o sul de Redington, como foi discutido anteriormente. O cálculo das médias em localidades específicas demonstrou feições similares, i.e., a redução da topografia do sistema de depressão e barra e a presença de um fundo rígido quase horizontal (Figura 9). Como era esperado, o sistema de depressão e barra é menos distinto na média geral que na média de perfis individuais.

**Tabela 2:** Síntese do “Wave information System – WIS” (Sistema de Informação de Ondas, do órgão “Army Corps of Engineers”, USA). Dados de 1990 a 1996.

| Ano                | $H_{s, 12hr} (m)$ | $T_p, 12hr (s)$ | $H_{s, avg} (m)$ | $T_p, avg (s)$ |
|--------------------|-------------------|-----------------|------------------|----------------|
| 1990               | 1.94              | 8.4             | 0.33             | 3.67           |
| 1991               | 2.84              | 9.6             | 0.37             | 3.76           |
| 1992               | 2.62              | 10.0            | 0.38             | 3.89           |
| 1993               | 3.76              | 9.8             | 0.38             | 4.02           |
| 1994               | 2.74              | 9.0             | 0.35             | 3.75           |
| 1995               | 4.36              | 12.8            | 0.40             | 4.06           |
| Média de 6 anos    | 3.04              | 9.93            | 0.37             | 3.86           |
| STD (% of mediana) | 0.87 (29%)        | 1.52 (15%)      | 0.03 (7%)        | 0.16 (4%)      |

### Características do Perfil Médio de Praia

Ainda que tenha significativamente reduzido a magnitude da morfologia, o perfil médio representa uma tendência geral das mudanças na batimetria próximo da linha de costa. Como era esperado, a resolução de feições dinâmicas, tais como as barras litorâneas, diminui à medida em que aumentam as escalas temporais e espaciais utilizadas no processo de redução ao comportamento médio. Em outras palavras, é razoável considerar que a quantidade de detalhes das feições dinâmicas no processo de redução dos dados à média diminua com o aumento do tamanho da área de estudo e do intervalo de tempo envolvido. É importante observar que o perfil médio foi obtido a partir de um suficiente número de perfis isolados com adequada cobertura espacial e temporal, como forma de propiciar uma representação regional confiável da forma geral da batimetria no segmento litorâneo próximo da linha de costa.

*Comparação do Perfil Médio com as Previsões Empíricas*

Os resultados obtidos a partir do uso de expressões matemáticas bastante utilizadas – a função de poder (Eq. 1) e a função exponencial (Eq. 2) – foram comparadas com o perfil médio obtido. O parâmetro dimensional empírico  $A$  na Eq.1 (Bruun 1954; Dean 1977) tem sido predominantemente associado com a granulometria dos sedimentos. A determinação de  $A$  a partir da granulometria média dos grãos foi discutida por Moore (1982) e Dean (1987). Os parâmetros  $B$  e  $k$  em Eq. 2 foram estimados empiricamente (Bodge, 1992). Bodge (1992) não relacionou os parâmetros  $B$  and  $k$  diretamente com nenhuma condição hidrodinâmica particular, nem com propriedades sedimentológicas. Considerando-se que  $B$  representa a máxima profundidade no cálculo da função exponencial, o valor  $B$  deve ser igual ou maior do que a profundidade de fechamento.

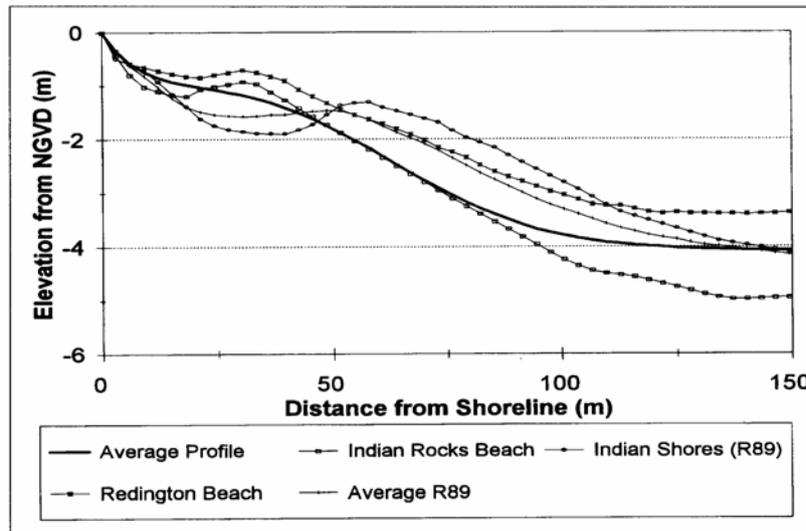
Incorporando o perfil da face de praia na linha de costa  $S_o$  na equação exponencial de Bodge (1992), Komar e McDougal (1994) mostraram que o coeficiente empírico  $B$  pode ser determinado como

$$B = \frac{S_o}{k} \quad (7)$$

O valor  $k$ , que controla a concavidade dos perfil calculado, pode ser definido a partir da distância e da profundidade de fechamento. Usando a Eq. 2, após expandida por Taylor, Komar and McDougal (1994) derivaram uma aproximação de terceira-ordem de  $k$  a

$$k = \frac{1}{X_c} \left( \frac{3}{2} - \left( \frac{6 D_c}{S_o X_c} - \frac{15}{4} \right)^{\frac{1}{2}} \right) \quad (8)$$

onde  $X_c$  é a distância da profundidade de fechamento da linha de costa. A Eq. 8 é aplicável apenas quando  $6D_c/S_o X_o > 3.75$  (Komar and McDougal 1994). O valor  $k$  pode também ser obtido pela cálculo numérico que resolve a Eq. 2 ao nível da profundidade de fechamento, dado o valor de  $S_o$ .

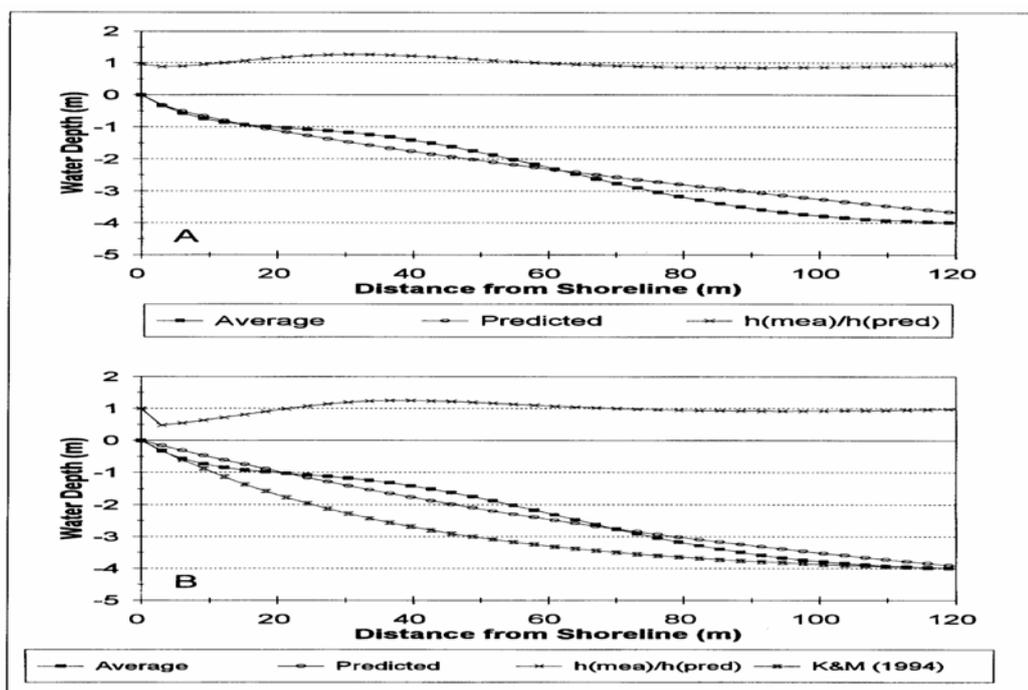


**Figura 9:** Comparação entre o (1) perfil médio obtido a partir de todos os perfis, (2) o perfil médio para a localidade R89 e (3) perfis isolados. (« Average profile »- Perfil médio).

Uma comparação entre os ajustamentos da Eq. 1 com o perfil médio é demonstrada na Figura 10A. O valor  $A$  em relação ao mínimo quadrado (« least-square ») foi determinado como da ordem de  $0.15 \text{ m}^{1/3}$ , o qual é essencialmente o mesmo que o  $A$  obtido da média de granulometria dos sedimentos (0.33 mm),

baseada na relação proposta por Moore (1982) e Dean (1987). A média granulométrica de 0.33 mm foi obtida a partir de 1.100 amostras de sedimentos coletadas na porção submersa imediatamente adjacente à linha de costa, a profundidades de -1.0 m e -3.7 m, durante os cinco anos de monitoramento em campo (Figura 2). Mesmo que todas as previsões concordem com o perfil médio (Figura 10A), a parte offshore do perfil mostra-se bem melhor definida do que o segmento litorâneo submerso próximo da linha de costa, como indicado tanto pelas elevações medidas em campo quanto pelas calculadas através do uso das equações.

O perfil médio também foi razoavelmente reproduzido com o uso da função exponencial (Eq. 2). A porção offshore mostrou melhor adequamento que a porção litorânea adjacente (Figura 10B). O valor do mínimo quadrado de  $B$  encontrado foi da ordem de 6.05 m, 67% maior do que os 3.64 m obtidos por Bodge (1992) para a costa da Flórida ao longo do Golfo do México. O valor do mínimo quadrado de  $B$  é 52% maior do que a média da profundidade de fechamento de -4.0 m na área de estudo. O valor  $B$  obtido por Bodge (1992) é 9% mais baixo do que a média da profundidade de fechamento de -4.0 m, e aproximadamente 26% mais baixa do que a profundidade de fechamento de -4.9 m, que ocorre onde não há controle direto do fundo rígido. O valor maior de -6.05 m, obtido por esse estudo, parece mais razoável. Faz-se necessário no entanto que o perfil calculado se estenda em direção ao oceano a partir da profundidade de fechamento - de outra forma, as equações não podem ser usadas em modelos morfológicos tais como o GENESIS (Hanson e Kraus, 1989), assim como em diversos cálculos de engenharia relacionados com a profundidade de fechamento. Os valores  $B$  obtidos por Bodge (1992) para 4 de 10 grupos de perfis são menores que 3.7 m. Um baixo valor, não razoável, de -2.62 m, foi sugerido para a extensão situada entre Folly Beach, Carolina do Sul, e Tybee Island, Georgia. Na verdade, uma maior quantidade de estudos em relação à profundidade de fechamento e o parâmetro  $B$  fazem-se necessários para a aplicação da função exponencial. O mínimo quadrado que se adequa ao valor  $k$  foi definido como sendo  $0.0087 \text{ m}^{-1}$ , 16% menor do que o valor obtido por Bodge (1992).



**Figura 10:** Perfil médio e perfil calculado (através do mínimo quadrado), usando A) a função poder ; B) a função exponencial e a solução apresentada por Komar e McDougal, 1994 (na horizontal, profundidade da água; na vertical, distância da linha de costa; ‘average’- média; ‘predicted’ – calculado; “h (mea)” – h (mediana); “h(pred)” – h (calculado); “K e M, 1994” – Komar e McDougal, 1994.

Usando valores de perfis de praia  $S_o$  e a localização da profundidade de fechamento ( $X_c, D_c$ ) indicada pelo perfil médio, os parâmetros  $B$  e valor  $k$  foram obtidos baseados na análise de Komar e McDougal (1994). O parâmetro  $B$  encontrado foi da ordem de 4.18 m, o qual é maior do que o valor obtido por Bodge (1992) e consideravelmente menor do que o valor do mínimo quadrado de 6.05 m. O valor  $k$  foi determinado como sendo da ordem de  $0.026 \text{ m}^{-1}$ , o qual é quase três vezes maior do que valores obtidos tanto pelo cálculo do mínimo quadrado quanto pelos valores obtidos por Bodge (1992). Como demonstrado na Figura 10B, usando o valor  $B$  e  $k$  calculados a partir do método de Komar e McDougal (1994), o cálculo na região próxima da linha de costa, assim como na porção offshore próxima da profundidade de fechamento, foi consideravelmente melhorado. No entanto, a curvatura geral do perfil foi largamente superior ao previsto, em função do grande valor calculado para  $k$ .

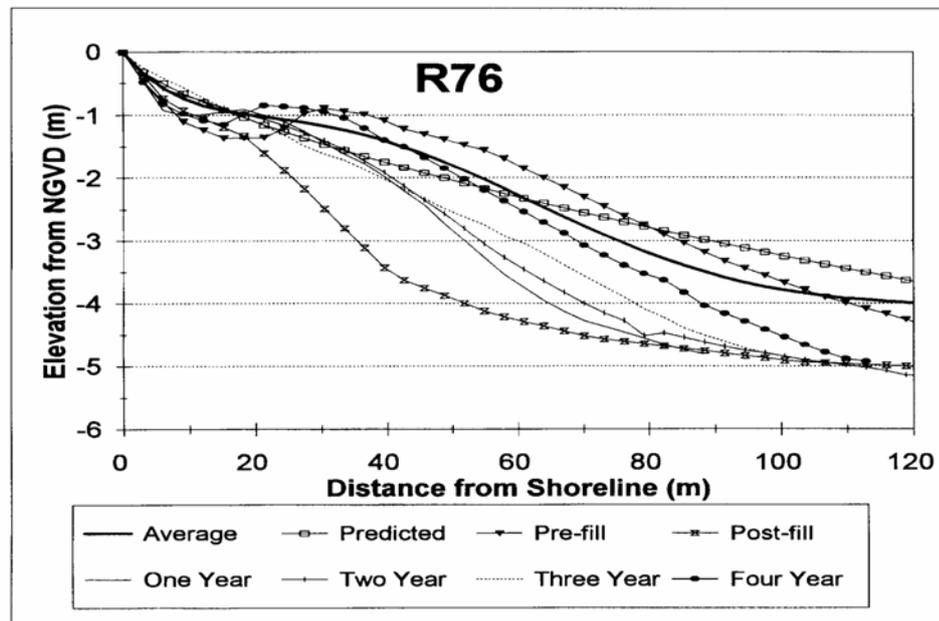
O desvio padrão em relação à média  $h_{average}/h_{predicted}$ , o qual foi usado para demonstrar todos os cálculos realizados através das equações (Figura 10), corresponde a 18% para a função exponencial, sendo levemente superior aos 14% obtidos a partir do uso da função poder 2/3 (Eq. 1). A função exponencial subestimou o desnível a partir da linha de costa em direção à depressão litorânea. Embora a reprodução geral da função poder 2/3 seja apenas levemente melhor do que a da função exponencial, a área próxima da linha de costa, a partir da praia em direção à depressão litorânea, é reproduzida consideravelmente melhor através da mais simples função poder 2/3. Foi avaliado que a Eq. 1 produz uma irrealista vertente infinita na linha de costa, e várias modificações foram propostas na perspectiva de contornar esse problema (e.g., Larson and Kraus 1989; Dean 1991). No presente estudo, todos os perfis foram digitados com um intervalo de 3 m de distância, levemente menor do que o intervalo de 5 m do perfil médio. Na presente pesquisa, foi avaliado que usando o intervalo de 3m, a Eq. 1 reproduz a média da vertente na área próxima da linha de costa ; ainda assim, o problema com a vertente infinita ao nível da linha de costa continua a existir.

Todos os perfis utilizados nessas análises foram monitorados em campo no mínimo 6 meses depois do início da alimentação superficial. A vertente obtida a partir da linha de costa em direção à profundidade de fechamento, situada a -4m, é mais íngreme no perfil médio do que no calculado a partir da Eq. 1 (Figura 11). Essa vertente íngreme nos perfis monitorados é provavelmente influenciada pela alimentação artificial da praia. Como demonstrado na Figura 11, até 4 anos depois da alimentação, os perfis ainda estão em processo de reajustamento lento e se aproximando da forma pré-alimentação artificial, especialmente no que diz respeito ao segmento do perfil da profundidade de fechamento que vai até a parte mais distante do banco litorâneo. Também foi observado que o material de empréstimo utilizado na alimentação artificial da praia foi mais grosseiro do que o material natural, fato que contribui para a geração do perfil íngreme após a alimentação. O processo de ajustamento do perfil também explica o elevado desvio padrão entre -2.4 m a -4.0 m, o qual foi observado durante a determinação da profundidade de fechamento, especialmente em Indian Rocks (Figura 3B) e Indian Shores (Figura 4B).

Como era esperado, a taxa de ajustamento foi mais rápida imediatamente após a alimentação artificial, e diminuiu significativamente com o tempo (Figura 11). Vale a pena mencionar o fato de que, nas Figuras 9 e 11, o eixo horizontal corresponde à distância da linha de costa, mas não tomando um elemento fixo. Considerando que a posição da linha de costa muda com o tempo, as Figuras 9 e 11 comparam, nestes termos, mais a forma do perfil do que o valor das elevações.

Os modelos de perfis discutido acima são todos monotônicos, i.g., a profundidade da água aumenta monotonicamente com o aumento da distância da linha de costa. O objetivo desse tipo de modelo é fornecer uma representação regional da forma geral da batimetria próximo à linha de costa, muito mais do que reproduzir formas dinâmicas detalhadas - tais como o sistema de depressão e barra, onde a profundidade local da água diminui à medida que aumenta a distância da linha de costa. Wang e Davis (1998) desenvolveram um perfil modelo para a área de estudo, dividindo o perfil em três segmentos. A segmentação de perfis foi originalmente proposta por Inman et al. (1993), baseados na compreensão de

que a barra litorânea próxima da linha de costa pode ser a separação entre dois sistemas independentes em sub-equilíbrio.



**Figure 11:** Ajustamento gradual do perfil após a alimentação artificial da praia (localidade R 76). A distância zero foi tomada a partir de pontos pré-determinados no campo (normalmente o “seawall”) para a linha de costa (na vertical : elevação a partir do NGVD; na horizontal: distância da linha de costa; ‘average’ - média; ‘predicted’- calculada; ‘pre-fill’ - pré-alimentação artificial; ‘post-fill’- pós-alimentação artificial; ‘one year’ - primeiro ano; ‘two year’- segundo ano; ‘three year’- terceiro ano; ‘four year’- quarto ano.

### *Síntese e Conclusões*

A profundidade de fechamento obtida como o resultado de 5 anos de monitoramento, aqui definida como o limite offshore além do qual o perfil não exhibe mudança significativa nas elevações, foi determinada a partir da realização de sucessivas missões de campo, com produção e monitoramento de perfis de praia. A profundidade de fechamento foi definida como sendo da ordem de -4.9 m NGVD na porção setentrional de Sand Key, decrescendo em direção ao sul para atingir -3.0 m em Redington. Três fatores são importantes no controle da profundidade de fechamento na área estudada: 1) o intervalo de tempo durante o qual a profundidade de fechamento é definida, 2) o clima de ondas, especialmente o clima de ondas extremas, e 3) a elevação e a distribuição regional dos afloramentos de rochas sólidas (fundo rígido). Embora a profundidade de fechamento determinada nesse estudo tenha sido baseada em um monitoramento de dados em campo com duração de 5 anos (3 anos para Indian Shores), comparações com estudos prévios indicaram que os valores podem perfeitamente ser aplicados para efeito de alimentação de praias. O tempo de duração de alimentação de praias nessa área é tipicamente da ordem de 7 anos.

Na porção norte de Sand Key, a profundidade de fechamento é mais constante e rasa do que o fundo rígido horizontal adjacente, e acredita-se que os valores obtidos sejam controlados mais pelas condições de ondas extremas. A profundidade de fechamento ao sul de Indian Shores e Redington é controlada, ao contrário, pela exposição de rochas sólida no substrato oceânico; a profundidade de fechamento nessa área diminui em direção ao sul. Usando o sistema WIS para dados offshore na área a profundidade de -8m, a equação de Hallermeier (1978) superestimou de forma acentuada a profundidade de fechamento. Usando a média de 6 anos de condições extremas de ondas, a equação de Birkemeier (1985) reproduziu bem a profundidade de fechamento medida em campo.

Tanto a função de poder  $2/3$  quanto a função exponencial reproduziram bem o perfil médio. A porção offshore foi melhor calculada do que o segmento próximo da linha de costa. A função poder  $2/3$  reproduziu a região próxima da linha de costa, a partir do limite externo da praia em direção ao fundo da depressão, consideravelmente melhor que a função exponencial, a qual significativamente subestimou a vertente próxima da linha de costa para as praias de Sand Key.

O perfil de praia, especialmente a parte relativa à extremidade externa da barra litorânea em direção à profundidade de fechamento, ainda está gradualmente se ajustando e se aproximando da forma do perfil pré-alimentação artificial, quatro anos depois da alimentação artificial ter sido finalizada, particularmente em Indian Rocks. Esse processo de ajustamento contribui para a ocorrência de perfil mais íngreme no perfil médio do que no calculado através das equações, em adição ao uso de material de empréstimo mais grosseiro que o natural no processo de alimentação artificial. A taxa de ajustamento diminui à medida em que o tempo passa, uma vez finalizada a alimentação.

### *Agradecimentos*

Os dados a partir dos quais esse artigo foi produzido resultaram de projetos de alimentação artificial de praia mantidos pelo município de Pinellas e o Departamento de Proteção Ambiental da Flórida (« Florida Department of Environmental Protection»). Diversos alunos do Laboratório de Pesquisas Costeira da Universidade da Flórida auxiliaram na coleta e processamento dos dados. Nós agradecemos aos doutores Robert Dean e Paul Komar pela revisão crítica do texto original, e a doutora Vanda Claudino Sales, pela tradução desse texto do inglês para o português.

### *NOTAS*

<sup>1</sup> Artigo traduzido do inglês para o português por Vanda Claudino Sales (UFC)

### *Bibliografia*

- BIRKEMEIER, W.A. Field data on seaward limit of profile change. **J. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering**, ASCE Press, 111(3), 1985, p.598-602.
- BODGE, K.R. Representing equilibrium beach profiles with an exponential expression. **J. Coastal Research**, 8, 1992, p.47-55.
- BRUUN, P. Coast erosion and the development of beach profiles. **Technical Memorandum No. 44**, U.S. Army Corps of Engineers, Beach Erosion Board, 1954.
- DAVIS, R.A. Regional coastal morphodynamics along the United States Gulf of Mexico. **J. Coastal Research**, 13, 1997, p.595-604.
- DAVIS, R.A., Fitzgerald, M.D. **Beaches and coasts**. Blackwell Publishing, Oxford, 2004, 419p.
- DAVIS, R.A., Fitzgerald, M.V., and Terry, J. Turtle nesting on adjacent nourished beaches with different construction styles: Pinellas County, Florida. **J. Coastal Research**, 15(1), 1999a, p. 111-120.
- DAVIS, R.A., Wang, P., and Silverman, B.R. Comparison of the performance of three adjacent and differently constructed beach nourishment projects on the Gulf peninsula of Florida. **J. Coastal Research**, in press, 1999b.
- DEAN, R.G. Equilibrium beach profiles: U.S. Atlantic and Gulf coasts. **Ocean Engineering Report No. 12**, Department of Civil Engineering, University of Delaware, Newark, Delaware, 1977.
- DEAN, R.G. Coastal sediment processes: Toward engineering solutions. **Proceedings of Coastal Sediments '87**, ASCE Press, 1987 p.1-24.

- DEAN, R.G. Equilibrium beach profiles: Characteristics and applications. **J. Coastal Research**, 7, 1991, p. 53-84.
- DEAN, R.G. and Li, L. The northern Redington Beach nourishment project: comparison of measured and predicted performance. **Proc. 1990 National Conference on Beach Preservation Technology**, FSBPA, Tallahassee, Florida, 1990.
- GIBEAUT, J.C. **Morphodynamics classification, evolution, and modeling of unstructured inlets in west-central Florida**. Unpublished Ph.D. *dissertation*, University of South Florida, Tampa, Florida, 1991.
- HALLERMEIER, R.J. Calculating a yearly limit depth to the active beach profile. **TP-77-9, U.S. Army Corps of Engineers, Coastal Engineering Research Center**, Fort Belvoir, VA, 1977 .
- HALLERMEIER, R.J. Uses for a calculated limit depth to beach erosion. **Proc. 16th Conference on Coastal Engineering**, ASCE Press, 1978, p.493-1512.
- HALLERMEIER, R.J. A profile zonation for seasonal sand beaches from wave climate. **Coastal Engineering**, 4, 1981, p.253-277.
- HALLERMEIER, R.J. Sand transport limits in coastal structure design. **Proc. Coastal Structures '83**. ASCE Press, 1983, p.703-716.
- HANSON, H. and Kraus, N.C. GENESIS: Generalized Model for Simulating Shoreline Change. **Technical Report CERC-89-19**, Coastal Engineering Research Center, US Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi, 1989.
- HOUSTON, J.R. Beach-fill volume required to produce specific dry beach width. **Coastal Engineering Technical Note CETN II-32**, US Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi, 1995.
- INMAN, D.L., Elwany, M.H.S. and Jenkins, S.A. Shorerise and bar-berm profiles on ocean beaches. **J. of Geophysical Research**, 98(C10): 18,181-18,199, 1993.
- KOMAR, P.D. and McDougal, W.G. The analysis of exponential beach profiles. **J. of Coastal Research**, 10, 1994, 59-69.
- KRAUS, N.C. and Harikai, S. (1983) Numerical model of the shoreline change at Oarai Beach. **Coastal Engineering**, 7(1), 1-28.
- KRAUS, N.C. and Heilman, D.J. Comparison of beach profiles at a seawall and groins, Corpus Christi, Texas. **Shore and Beach**, 66(2), 1998, 4-13.
- KRAUS, N.C., Larson, M., and Wise, R.A. Depth of closure in beach fill design. **Proc. 1999 National Conference on Beach Preservation Technology**, FSBPA, Tallahassee, Florida, 1999.
- LARSON, M. Quantification of beach profile change. **Report No. 1008**, Department of Water Resources Engineering, Lund University, Lund, Sweden, 1988.
- LARSON, M. Equilibrium profile of a beach with varying grain size. **Proc. Coastal Sediments '91**, ASCE Press, 1991, p. 861-874.
- LARSON, M. and Kraus, N.C. SBEACH: Numerical modeling for simulating storm-induced beach change - Report 1: empirical foundation and model development. **Technical Report, CERC-89-9**, Coastal Engineering Research Center, U.S. Army corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi, 1989.
- LARSON, M. and Kraus, N.C. Temporal and spatial scales of beach profile change, Duck, North Carolina. **Marine Geology**, 117, 1994, 75-94.
- MOORE, B.D. **Beach profile evolution in response to changes in water level and wave height**. *Masters Thesis*, Department of Civil Engineering, University of Delaware, Newark, Delaware, (1982).
- MOUTZOURIS, C.I. Beach profile vs. cross-shore distribution of sediment grain size. **Proc. Coastal Sediments '91**, ASCE Press, 1991, p.419-431.
- TANNER, W.F. Florida coastal classification. **Transactions of Gulf Coast Association of Geological Society**, 10, 1960, 259-266.
- WANG, P. and Davis, R.A., Jr. A beach profile model for a barred coast – case study from Sand Key, west-central Florida. **J. Coastal Research**, 14, 1998, p.981-991.

WORK, P. A. and Dean, R.G. Effect of varying sediment size on equilibrium beach profiles. **Proc. Coastal Sediments '91**, ASCE Press, 1991, p.891-904.

Trabalho enviado em janeiro de 2008

Trabalho aceito em março de 2008