

Correlação estratigráfica entre radar de penetração de solo e teste de penetração padrão em sistemas de barreiras costeiras

Stratigraphic correlation between ground penetrating radar and standard penetration test in coastal barrier systems

Leonardo Gonçalves de Lima¹ 

¹Universidade Federal do Maranhão, Departamento de Oceanografia e Limnologia. Avenida dos Portugueses, 1966, Bacanga, CEP: 65080-805, São Luís, MA, BR (lima.leonardo@ufma.br)

Recebido em 25 de maio de 2022; aceito em 28 de junho de 2023.

Resumo

O *Ground-penetrating radar* (GPR) ou georadar tem sido utilizado com sucesso em regiões costeiras para localizar e identificar estruturas sedimentares. Essa técnica promove um rápido desenvolvimento de aquisição, e em certos ambientes costeiros proporciona um conjunto de dados único para a análise estratigráfica. Na grande maioria dos casos de aplicação do GPR, a correlação de profundidade é realizada com uma sondagem geológica balizando os refletores com base em uma análise estratigráfica. Mesmo assim existe uma limitação em função de alguns estratos sedimentares não apresentarem mudanças texturais em sua composição; quando as apresentam, encontram-se em resolução inferior ao registro de GPR. Outra maneira de balizar os registros eletromagnéticos e geológicos dá-se por meio de dados de compactação sedimentar, mediante a aplicação de sondagens *standard penetrating test* (SPT). Assim foram executadas três sondagens SPT sobre uma linha de 1,5 km de aquisição com GPR. A correlação entre essas duas técnicas possibilitou o balizamento por horizontes estratigráficos com diferenças quanto à compactação sedimentar, especificamente pela diferença de compactação na interface de sedimentos eólicos e praias.

Palavras-chave: Geotécnica; Sondagens geológicas; Sedimentologia; Compactação sedimentar.

Abstract

Ground-penetrating radar (GPR) or georadar has been successfully used in coastal regions studies to locate and identify sedimentary structures. This technique promotes rapid acquisition development, and in certain coastal environments provides a unique dataset for stratigraphic analysis. In the vast majority of GPR application cases, the depth correlation is performed with a geological survey, marking the reflectors from a stratigraphic analysis. Even so, there is a limitation due to the fact that some sedimentary strata do not present textural changes in their composition; when they do, they are in lower resolution than the GPR record. Another way of marking the electromagnetic and geological records is based on sedimentary compaction data, through the application of standard penetrating test (SPT) soundings. Thus, three SPT soundings were performed on a 1.5 km acquisition line with GPR. The correlation between these two techniques allowed the marking of stratigraphic horizons that present differences in terms of sedimentary compaction, specifically by the compaction difference at the interface of aeolian and beach sediments.

Keyword: Geotechnics; Geological soundings; Sedimentology; Sedimentary compaction.

INTRODUÇÃO

O *ground-penetrating radar* (GPR) ou georradar é uma técnica de aquisição de informação espacial, utilizada para investigar ou detectar objetos e estruturas sob o solo. Sua primeira aplicação teve o intuito de determinar a espessura de mantos de gelo (Stern, 1929). Recentemente, este equipamento é utilizado para investigar as propriedades das camadas sedimentares e do lençol freático (Meyers et al., 1994; Paz et al., 2017; Lima et al., 2020). Nos últimos 70 anos, têm aumentado consideravelmente as aplicações, por exemplo, nas geociências. Consiste num método eletromagnético que gera pulsos de ondas de rádio de alta frequência (50 a 1600 MHz), com capacidade de adquirir grande quantidade de informação num tempo reduzido e de forma não invasiva. Este método fornece seções contínuas do subsolo utilizando como fonte transmissora uma antena eletromagnética que emite um sinal a uma frequência fixa, que pode penetrar sedimentos, rocha, gelo ou outros tipos de materiais naturais ou artificiais. Basicamente, este equipamento detecta alterações nas características eletromagnéticas dos materiais do subsolo a partir da energia transmitida (onda eletromagnética) e refletida ao atingir estruturas em subsuperfície ou em diferentes contatos entre materiais geológicos com diferentes permissividades dielétricas (ϵ). Parte da energia emitida que veio a ser refletida se propaga até a próxima descontinuidade e então retorna à antena receptora.

O GPR tem sido utilizado com sucesso em regiões costeiras para localizar e identificar estruturas sedimentares (Leatherman, 1987; Jol e Smith, 1991; Meyers et al., 1994; Bridge et al., 1995; Jol et al., 1996; Anthony e Moller, 2002; Dillenburg et al., 2011; Lima et al., 2013, 2020). Essa técnica é relativamente nova, de rápido desenvolvimento de aquisição e que, em certos ambientes costeiros, proporciona um conjunto de dados complementares, muitas vezes único (Neal e Roberts, 2000).

A maior dificuldade de operação do GPR centra-se no fato de que cada subsolo tem características dielétricas únicas, que devem ser testadas a fim de se obter uma melhor relação entre a frequência de antena utilizada com a profundidade de aquisição do dado, bem como a resolução almejada. De modo amplo, quanto maior a frequência, menor a profundidade de penetração do sinal e maior a resolução do registro. Mesmo após a aquisição do dado, existe uma séria dificuldade de correlação entre o registro de GPR e sua profundidade real, por conta, principalmente, das diferentes composições texturais dos sedimentos e suas implicações com a porosidade.

Na grande maioria dos casos de aplicação do GPR, a correlação de profundidade é realizada com uma sondagem geológica balizando os refletores a partir de uma análise estratigráfica. Mesmo assim, existe uma limitação devido a alguns estratos sedimentares não apresentarem mudanças texturais

em sua composição ou/e quando apresentam, podem estar em uma resolução inferior à resolução do registro de GPR. A instalação de alvos (geralmente metálicos) enterrados é uma alternativa viável em que a profundidade é conhecida, registrando hipérbolos no registro e, dessa forma, possibilitando uma aproximação da constante dielétrica a ser utilizada. No entanto, a aplicabilidade dessa alternativa é complexa e dependente da profundidade a ser alcançada. Outra maneira de balizar os registros eletromagnéticos e geológicos se dá a partir de dados de compactação sedimentar, mediante a aplicação de sondagens *standard penetrating test* (SPT).

A técnica (SPT) tem sido utilizada com sucesso na descrição e interpretação da estratigrafia de barreiras costeiras (Dillenburg et al., 2000, 2011). Consiste basicamente em uma medida de resistência dinâmica, conjugada a uma sondagem de reconhecimento. Essa técnica permite acessar grandes profundidades, porém de forma descontínua. Isto é, a cada metro sondado obtém-se a recuperação de 45 cm de registro sedimentar intacto (não perturbado) e 55 cm de registro sedimentar perturbado (amostra de calha). Para a extração das amostras intactas (45 cm), é realizada a percussão de um peso batente (65 kg) incidindo sobre hastes de penetração conectadas ao amostrador do tipo RAYMOND/TERZAGHI. A penetração deste amostrador fornece um índice (n° golpes/penetração do amostrador) de compactação do depósito sedimentar. A extração das amostras perturbadas (55 cm) é realizada por meio da perfuração manual com um trépano auxiliado de circulação de água com bentonita.

A conjugação destes métodos (GPR/SPT) possibilitou o balizamento por horizontes estratigráficos definidos em ambos os métodos e são o objetivo deste estudo.

MÉTODOS

A seção escolhida para perfilagem corresponde a uma seção transversal a uma barreira costeira arenosa na praia de Itapeva, município de Torres-RS, onde foram perfilados 2 km de seções com GPR (Figura 1). A configuração utilizada resumiu-se a um módulo GSSI (*Geophysical Survey Systems Inc.*) SIR-3000 e uma antena GSSI de 200 MHz de frequência central, em arranjo *Common Off Set* que consiste no deslocamento simultâneo da antena receptora e transmissora, mantendo-se uma distância fixa entre elas (Figura 2). O pós-processamento dos dados de GPR foi executado nos *softwares* RADAN 6.6 e ReflexW. As etapas de processamento foram inicialmente com o filtro *Dewow* e filtro *Fk* para *posterior background removal* e ajustes manuais de ganho em profundidade. Com base nos resultados das perfilagens, foram definidos refletores alvos que orientaram a escolha dos locais de execução de 3 sondagens SPT.

A técnica SPT é regulamentada no Brasil pela normativa NBR 6468 (ABNT, 2020) e consiste basicamente em uma

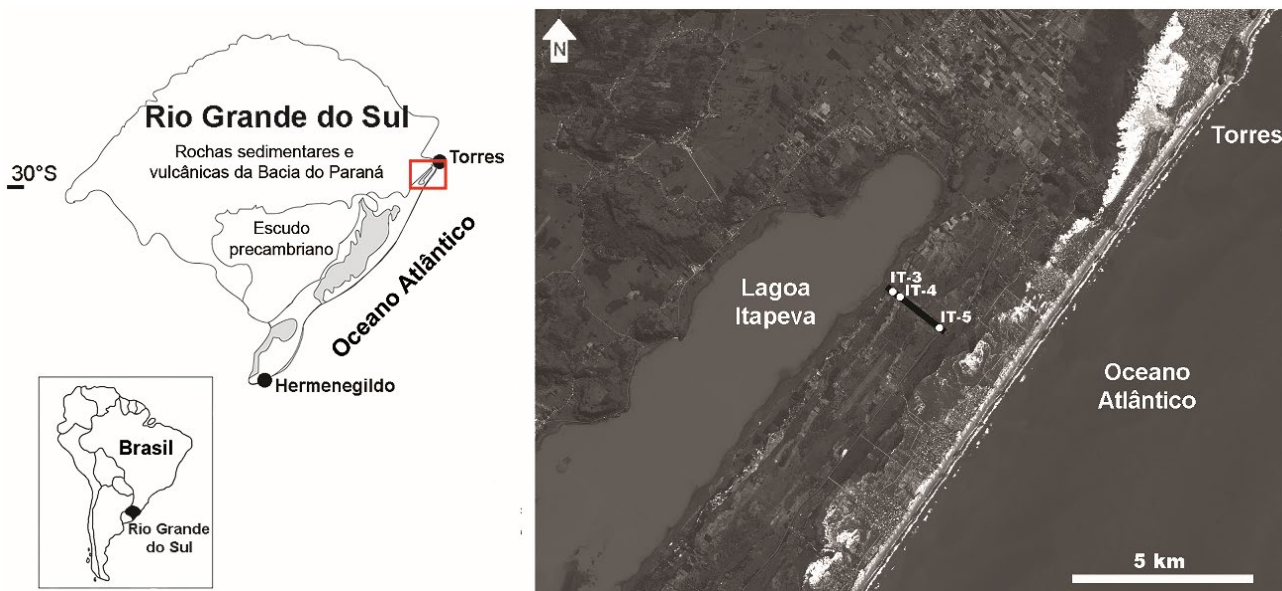


Figura 1. Localização das sondagens teste de penetração padrão e da perfilagem de radar de penetração de solo.

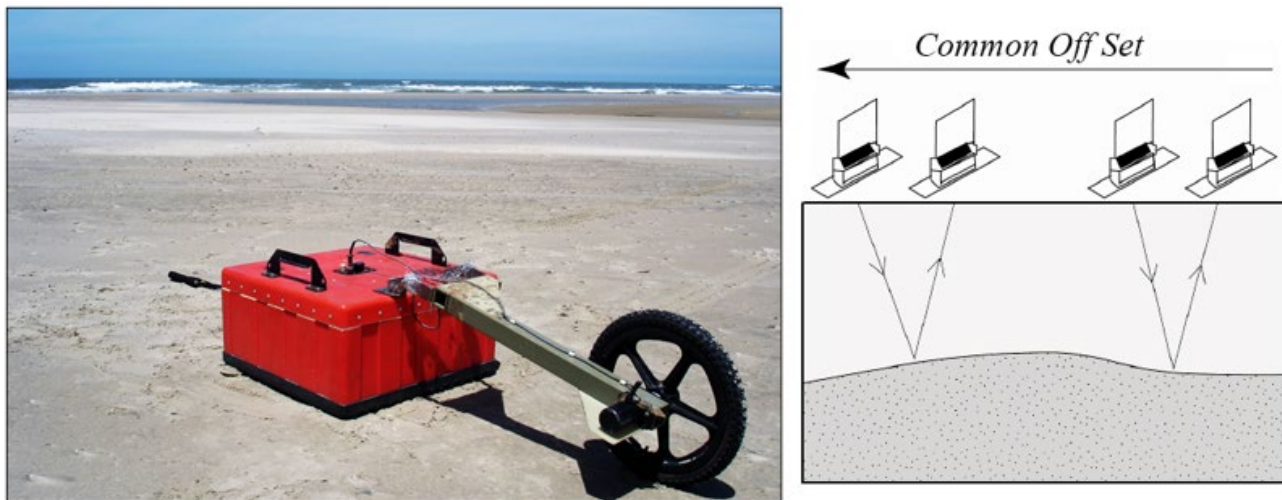


Figura 2. Antena GSSI de 200 MHz utilizada em arranjo *Common Off Set*.

medida de resistência dinâmica, conjugada a uma sondagem de reconhecimento.

As análises composicionais das amostras sedimentares recuperadas das sondagens incluíram a análise granulométrica através de um analisador de partículas a laser CILAS (modelo 1180). As classes texturais foram individualizadas em 100 intervalos granulométricos definidos pelos limites de detecção dos sensores do analisador de partículas (Figura 3). O tratamento estatístico das amostras seguiu as técnicas descritas por Folk e Ward (1957).

As cotas topográficas do terreno foram adquiridas usando um GPS *Leica Viva CS15*. Esse posicionamento

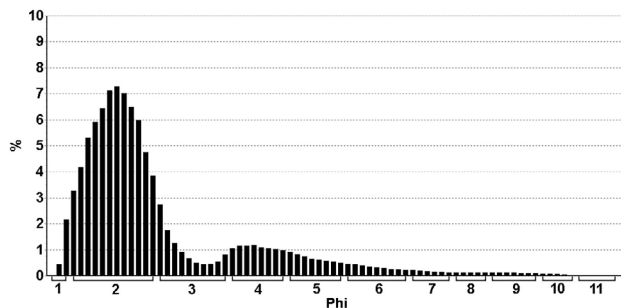


Figura 3. Histograma evidenciando os intervalos granulométricos definidos pelos sensores do CILAS em correspondência com seu diâmetro em phi.

foi referenciado ao ponto médio de espreamento das ondas na praia de Rondinha Nova e corrigido pela tábua de maré (DHN, 2011) para o porto de Imbituba-SC, situado cerca de 130 km ao norte da área de estudo.

RESULTADOS

O termo radarfácies foi utilizado para definir pacotes repetidos de refletores com caráter e geometria semelhante, enquanto seus limites de sequência foram determinados pela terminação dos refletores. De acordo com Van Overmeeren (1998), essa definição envolve as diferenças visíveis no padrão de reflexão de uma seção de GPR, ocasionadas por feições com características estruturais e texturais em sub-superfície. Os registros gerais identificaram estratos basais retrogradacionais compostos por leques de sobrelavagem, sendo estes recobertos por estratos progradacionais de praia, antepraia e eólicos. A interface entre esses registros retrogradacionais e progradacionais é pontuada por uma superfície de ravinamento por ondas (SR). Sete radarfácies foram definidas neste estudo e encontram-se sintetizadas na Figura 4 e estão descritas abaixo:

- **Radarfácies *Rf1pd*** é definida por refletores sub-horizontais, de alta amplitude e lateralmente contínuos e concordantes, estendendo-se por dezenas de metros. Esta geometria corresponde às planícies de deflação eólica encontradas na retaguarda das dunas frontais e entre o interduna associado aos cordões de dunas transgressivas;

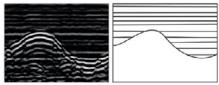
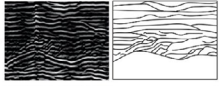
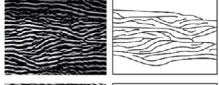
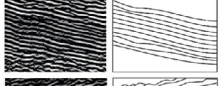
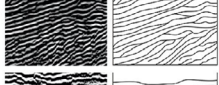
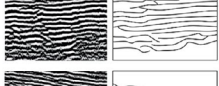
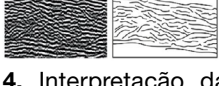
	Radarfácies	Interpretação
<i>Rf1pd</i>		Contínuo, alta amplitude sub-horizontais
<i>Rf2dt</i>		Descontínuo, baixa amplitude alto ângulo (15 – 20°) clinoformas curtas com mergulho em direção ao continente
<i>Rf2lda</i>		Descontínuo, alta amplitude clinoformas curtas com mergulho em direção ao oceano e ao continente
<i>Rf3ppe</i>		Contínuo, alta amplitude baixo ângulo (3 – 5°), mergulho em direção ao oceano
<i>Rf4lscd</i>		Moderadamente contínuo, alta amplitude alto ângulo (5 – 10°), mergulho em direção ao continente
<i>Rf4lscp</i>		Contínuo, alta amplitude baixo ângulo (1 – 2°), mergulho em direção ao continente
<i>Rf5as</i>		Descontínuo, baixa amplitude baixo ângulo (3 – 5°), mergulho em direção ao oceano

Figura 4. Interpretação das radarfácies para a área de estudo.

- **Radarfácies *Rf2dt*** é definida por refletores descontínuos e ondulados de baixa amplitude e alto ângulo (15 – 20°), com clinoformas curtas e mergulho em direção ao continente. A *Rf2dt* ocorre lateralmente a *Rf1pd* e define a face de deslizamento das dunas transgressivas. A *Rf2dt* assim como a *Rf1pd* preenche a topografia de cristas e cavas determinada pela *Rf2lda* e *Rf2df* definida a seguir;
- **Radarfácies *Rf2lda*** ocorre sempre vinculada à proximidade da margem lagunar e apresenta refletores descontínuos, de alta amplitude, e clinoformas curtas com mergulhos tanto em direção ao oceano quanto em direção ao continente e por vezes, côncavos. Esta forma de deposição não apresenta feições morfológicas como crista ou face de deslizamento. Atualmente no Rio Grande do Sul sua formação pode se dar próximo às margens do campo de dunas livres (dunas transgressivas) e junto aos corpos lagunares. Um padrão similar de radarfácies foi descrito por Bristow et al. (2000) como resultado de acreção eólica no entorno de montículos de vegetação ou acumulação biotopográfica;
- **Radarfácies *Rf3ppe*** apresenta refletores lateralmente contínuos, simétricos e concordantes estendendo-se por 30 m ou mais, de alta amplitude, subplanar e levemente ondulado, com mergulhos de 3 – 5° em direção ao oceano. Estes refletores correspondem aos ambientes deposicionais do pós-praia/estirâncio, em que sua espessura não ultrapassa 5 m e algumas vezes com contato indefinido com refletores adentrando a radarfácies superior (*Rf2dt*) e inferior (*Rf5as*);
- **Radarfácies *Rf4lscd*** apresenta refletores contínuos, de alta amplitude, alto ângulo (10°) e mergulho em direção ao continente. Este padrão indica a deposição distal dos leques de sobrelavagem adentrando a lâmina d'água do corpo lagunar na retrobarreira (Schwartz, 1982; Murakoshi e Masuda, 1991; Anthony e Moller, 2002; Neal et al., 2003). Estes refletores definem a posição da margem lagunar no momento de instalação do leque de sobrelavagem;
- **Radarfácies *Rf4lscp*** apresenta refletores contínuos, de alta amplitude, baixo ângulo (1 – 2°), concordantes e mergulho em direção ao continente. Este padrão exibe uma geometria suavemente côncava e ondulada dos refletores o que indica uma deposição proximal dos leques de sobrelavagem, provavelmente sobre a área emersa da barreira (Schwartz, 1975);
- **Radarfácies *Rf5as*** é análoga aos ambientes deposicionais da antepraia superior. Apresenta refletores descontínuos, ondulados, de baixa amplitude e baixo ângulo (3 – 5°) e mergulho em direção ao oceano. Ocorrem de forma distinta da *Rf3ppe* principalmente pela menor continuidade dos refletores. O limite inferior desta unidade não é evidente devido à atenuação do sinal de GPR, em função da presença de sedimentos finos em

sua composição. A sondagem IT-3 posiciona-se sobre a barreira costeira, em que o topo da sondagem encontra-se a +8 m da cota do nível médio do mar (NMM) e a base alcança a profundidade de -24 m partindo da superfície do terreno (Figura 5). Quatro fácies puderam ser individualizadas na sondagem IT-3. A base, com 1 – 2 m de espessura, corresponde à fácies–PB (pântanos basais), de características arenosas (18% de silte), bem selecionada e muito compacta.

Acima da fácies–PB ocorre a também arenosa fácies–LE (lagunar/estuarina) (17% de silte) com espessura de 3 m e

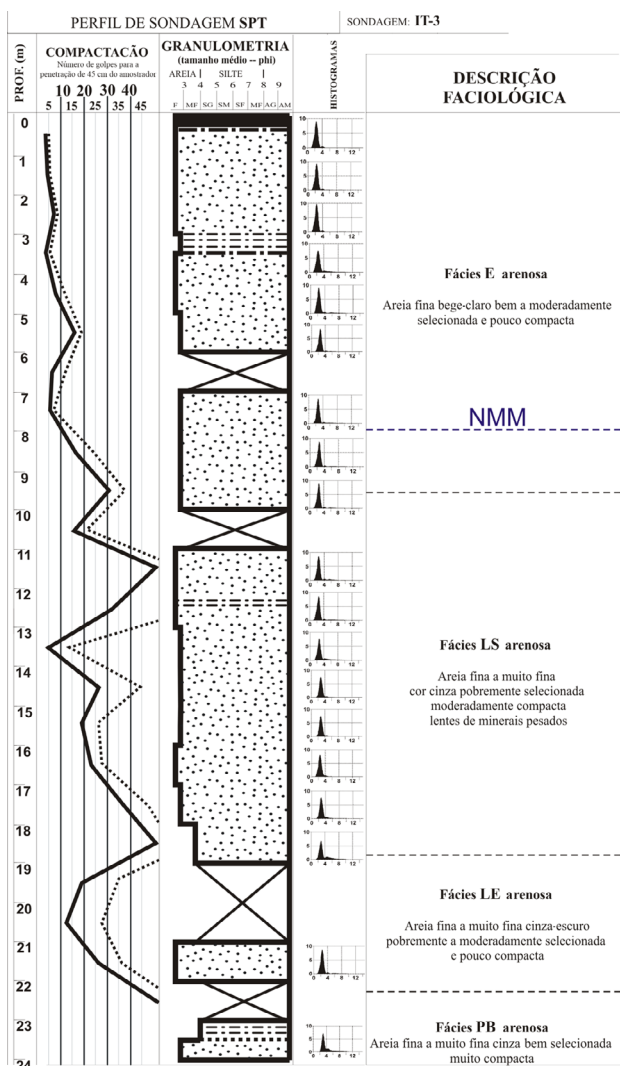


Figura 5. Registros sedimentares e ensaios de compactação da sondagem IT-3, a linha pontilhada azul indica a posição do nível médio do mar, as linhas pontilhadas em preto representam os limites das fácies sedimentares; a compactação está indicada pelo número de golpes para penetração do amostrador.

composição de areia fina a muito fina, pobremente a moderadamente selecionada e pouco compacta. Acima, ocorre a fácies–LS (leques de sobrelavagem) arenosa (> 10% de silte), com 9 m de pacote sedimentar e textura fina a muito fina, moderadamente selecionada e moderadamente compacta com lâminas de minerais pesados. Na aproximação do topo, tornam-se constantes lentes de lama que conferem uma grande variação de compactação na fácies–LS. Seu topo é determinado pelo limite superior da *Rf4lscp* (Figuras 5 a 8), incidindo no primeiro máximo de compactação a partir da superfície na profundidade de 9,5 m. No topo da sondagem

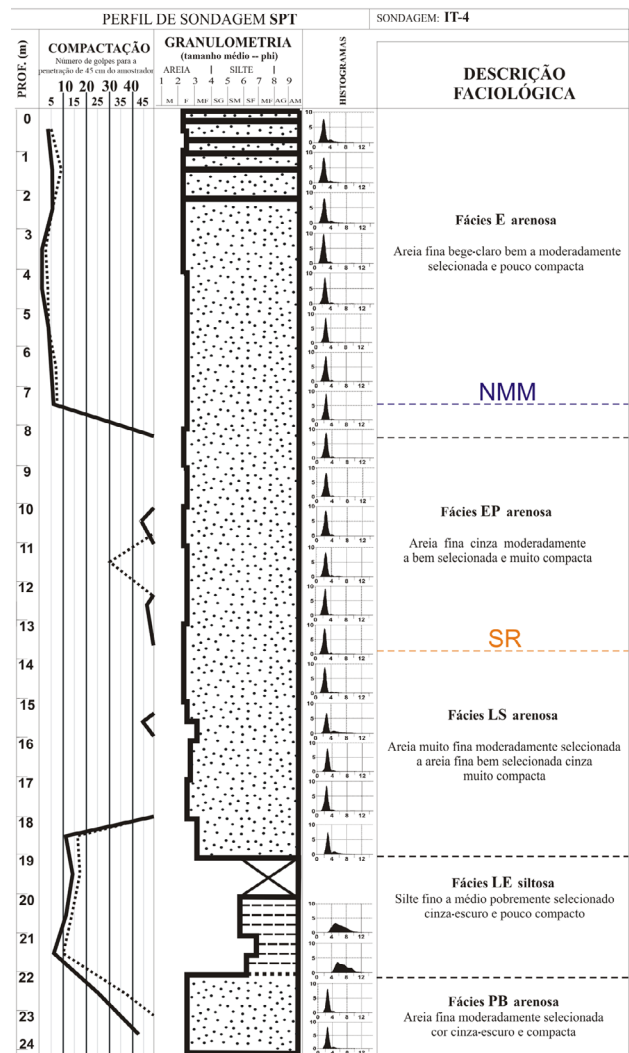


Figura 6. Registros sedimentares e ensaios de compactação da sondagem IT-4, a linha pontilhada azul indica a posição do nível médio do mar; as linhas pontilhadas em preto representam os limites das fácies sedimentares; a linha pontilhada laranja indica a superfície de ravinamento (SR); a compactação está indicada pelo número de golpes para penetração do amostrador.

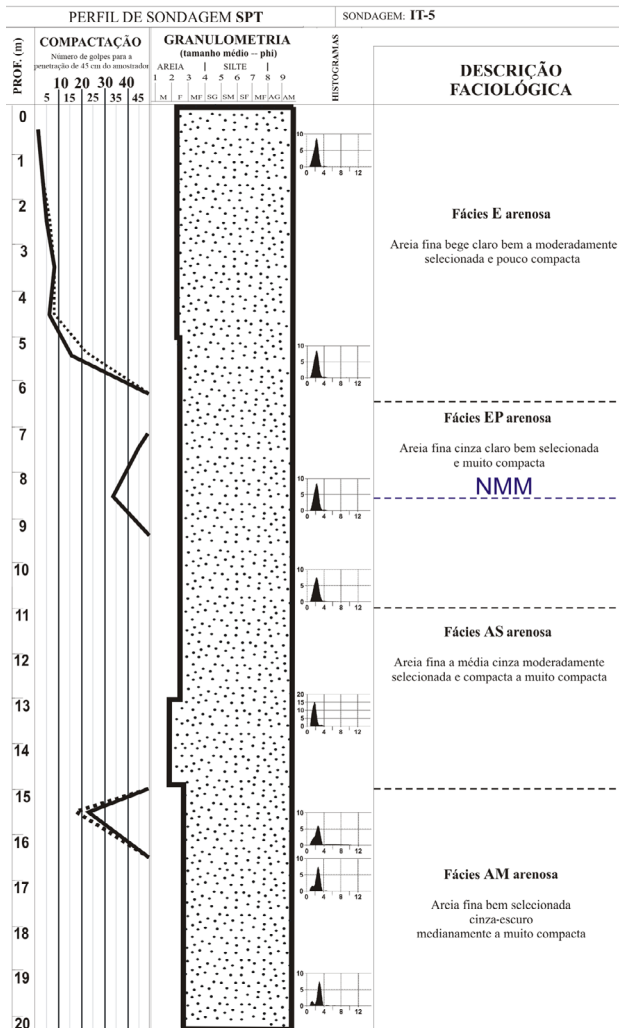


Figura 7. Registros sedimentares e ensaios de compactação da sondagem IT-5; a linha pontilhada azul indica a posição do nível médio do mar; as linhas pontilhadas em preto representam os limites das fácies sedimentares; a compactação está indicada pelo número de golpes para penetração do amostrador.

IT-3 ocorre a fácies-E (dunas/interdunas) arenosa fina, bem a moderadamente selecionada e pouco compacta.

A sondagem IT-4 insere-se na seção de GPR marcada pela presença de uma superfície de ravinamento (SR) ou superfície de erosão por ondas, manifestada pela interface entre *Rf3ppe* (pós-praia/estirâncio) e *Rf4ls* (leques de sobrelavagem) (Figura 8). A sondagem IT-4 aprofunda-se até -24 m com o topo a +7,5 m do NMM e compõe um perfil de cinco fácies (Figura 6). Da base até -22 m ocorre a fácies-PB arenosa fina ($\phi=2,7$), moderadamente selecionada e compacta. De forma gradacional, a base mais arenosa altera-se para a fácies-LE siltosa média a fina, pouco compacta e com espessura de 3 m. A amostra superior desta fácies não

foi recuperada devido à sua baixa compactação. Acima da fácies-LE, de maneira gradacional, ocorre a fácies-LS, arenosa com 5 m de espessura composta na base por areia muito fina pobremente selecionada, gradando para areia fina, bem selecionada e muito compacta. Acima desta fácies e limitada na base pela SR, ocorre a fácies-EP (estirâncio/pós-praia) arenosa fina, moderadamente a bem selecionada e muito compacta. A fácies de topo corresponde à fácies-E, a qual por sua vez limita-se na base ao primeiro máximo de compactação no perfil SPT em -8,4 m de profundidade (Figura 6). Compõe-se de areias finas que, de modo geral, são bem a moderadamente selecionadas e pouco compactas. Nesta fácies, posiciona-se o NMM a -7,5 m da superfície do terreno.

A sondagem IT-5 situa-se no extremo SE da seção de GPR (Figura 8). Esta sondagem alcançou 20,45 m de profundidade e posiciona-se a +8,5 m acima do NMM e comporta quatro fácies sedimentares (Figura 7). Na base ocorre a fácies-AM (antepraia média) com espessura de 5 m, arenosa fina ($\phi=2,8$), bem selecionada, de moderadamente a muito compacta. Laminações paralelas e lentes de lama centimétricas são presentes. Acima ocorre a fácies-AS (antepraia superior) arenosa composta de areia fina a média ($\phi=1,9$), moderadamente selecionada e de compacta a muito compacta. A espessura desta fácies é de 5 m, sendo que seu limite superior foi definido pelo registro dos refletores da radarfácies *Rf3ppe*. São verificadas laminações de minerais pesados e lentes de lama, ambas da ordem de milímetros. Contendo a posição zero do NMM e com a espessura de 4,5 m, ocorre a fácies-EP arenosa fina, bem selecionada e muito compacta. O topo da fácies-EP foi definido pelo comportamento do perfil (primeiro máximo) de compactação na sondagem na profundidade de +2 m acima do NMM (Figura 7). E, por fim, no topo desta sondagem ocorre a fácies-E, sobrepondo-se de forma gradacional à fácies-EP e corresponde a areias finas, bem a moderadamente selecionadas e pouco compactas.

DISCUSSÃO

Desde que o termo fácies foi introduzido por Gressly (1837), discute-se sua aplicabilidade no sentido de combinar relações espaciais e características internas com o estudo dos ambientes de sedimentação atuais (Atualismo Geológico). Com o advento do GPR, novas estratégias de imageamento dos depósitos passaram a complementar a análise faciológica, ampliando significativamente as relações espaciais entre fácies sedimentares. No entanto, uma precisa correlação entre os registros geofísicos e dados de sondagem continua sendo necessária e essencialmente complementar (características internas de fácies versus suas relações espaciais). Neste sentido, a compactação sedimentar torna-se um poderoso

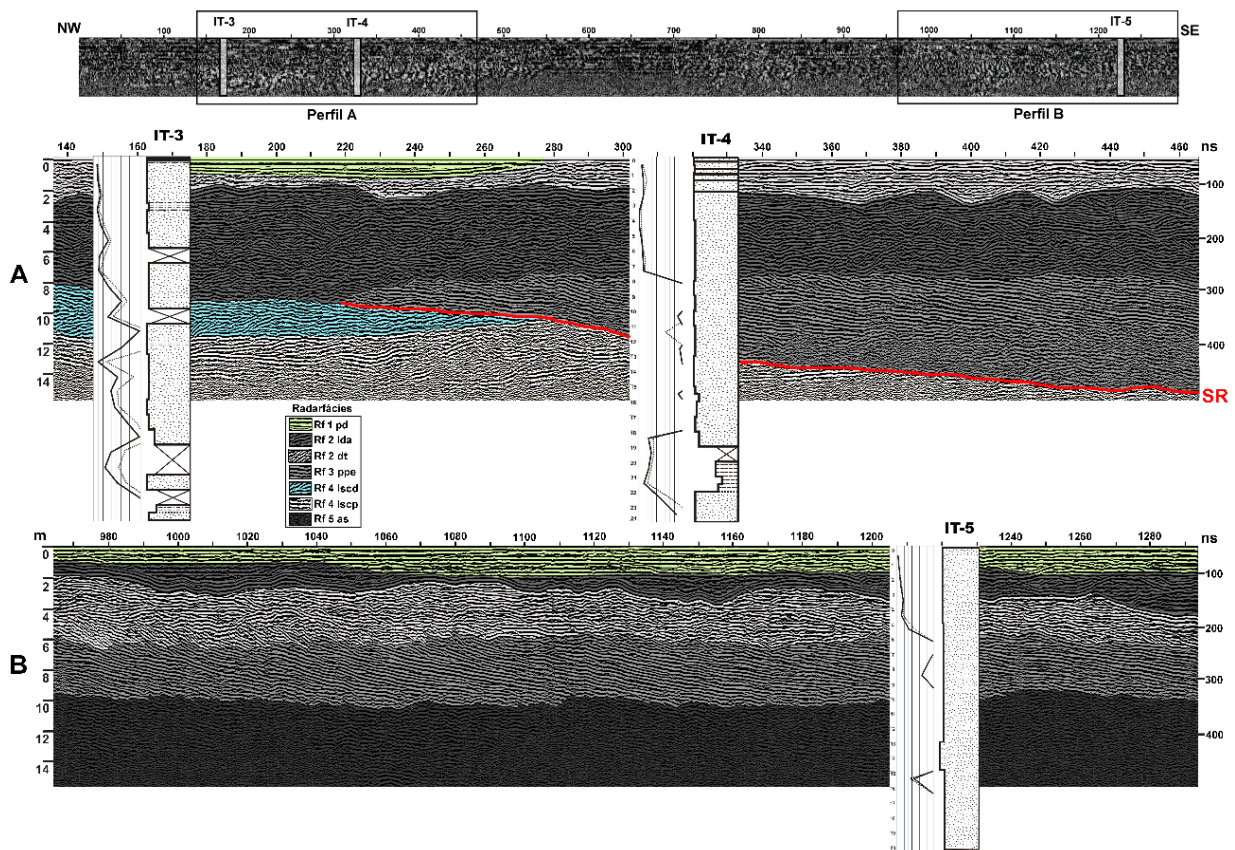


Figura 8. Seção de radar de penetração de solo levantada com antena de 200 MHz e sua correlação de profundidade com as sondagens teste de penetração padrão.

parâmetro para correlação, uma vez que, mesmo na ausência de estruturas sedimentares, diferenças litológicas entre estratos sedimentares, diferenças na granulometria, etc., este parâmetro estará sempre presente, indicando a porosidade, permeabilidade, empacotamento e, acima de tudo, servindo como caráter diagnóstico em estratos sedimentares sobrepostos ou lateralmente contínuos e descontínuos. A compactação dos sedimentos pode variar tanto bruscamente como gradacionalmente na interface dos ambientes deposicionais (Nishi et al., 1996). Quando variam bruscamente, indicam com relativa precisão esta alternância faciológica. De fato, quando em campo, a interface de depósitos eólicos/praias é facilmente distinguível em afloramentos (Figura 9), o que não se verifica em sondagens e na ausência de afloramentos.

Os registros geotécnicos evidenciados no presente estudo marcam com precisão a interface entre sedimentos eólicos e os sedimentos praias, em que são indicados por um aumento brusco no índice de compactação nas sondagens, passando de pouco compacto (< 10 golpes) para muito compacto (> 45 golpes) (Figuras 5 a 7). Esta diferença deve-se principalmente ao empacotamento dos grãos em ambiente subaquoso (empacotamento romboédrico),



Figura 9. Corte de drenagem truncando o pós-praia e estrâncio e depósitos eólicos, exibindo a estratificação cruzada de baixo ângulo dos depósitos praias, e a interface entre os depósitos (escala 10 cm).

quando comparado a ambientes eólicos (empacotamento cúbico). O que se verifica é que índices de compactação baixos correspondem às radarfácies que representam os ambientes deposicionais eólicos (*Rf1pd*, *Rf2lda*, *Rf2dt*).

No entanto, conforme as sondagens atingem os ambientes deposicionais do pós-praia/estirâncio (*Rf3ppe*) ou os leques de sobrelavagem (*Rf4lscp* ou *Rf4lscd*), os valores de compactação elevam-se bruscamente, pontuando o registro de compactação nesta interface (Figuras 5 a 7).

No registro sedimentar e granulométrico do presente estudo, tanto as fácies eólicas como as praias e de leques de sobrelavagem, são praticamente indistinguíveis pela sua granulometria (areia fina). Ou seja, o parâmetro granulometria por si só impossibilita a correlação entre litologia e GPR, uma vez que os ambientes citados são indistinguíveis somente por este parâmetro. Dessa forma, foram utilizados os dados de compactação como alternativa viável para esta correlação estratigráfica, ampliando também a precisão desta correlação. Isto possibilitou o ajuste da profundidade (janela de observação) do registro de GPR em 16 m, correspondendo a uma constante dielétrica de $12 \epsilon'$. Este ajuste se deu por correlação entre o topo dos refletores *Rf3ppe* com o topo da fácies EP nas sondagens IT-4 e IT-5. Cabe salientar que a constante para areia saturada pode variar de $20 - 30 \epsilon'$, e que areia seca varia de $2 - 6 \epsilon'$, segundo Porsani (1999). No entanto, o que se observa neste estudo é que o valor de $12 \epsilon'$ obtido a partir da correlação entre a interface de compactação entre sedimentos eólicos e praias e o topo dos refletores da radarfácies *Rf3ppe*.

O perfil de GPR foi interceptado por três sondagens SPT (IT-3, IT-4 e IT-5), precisando a medição entre a interface eólico/praias/leques de sobrelavagem no registro de compactação SPT como o primeiro registro de máxima de compactação a partir da superfície. Desta forma, os registros de georradar na interface entre as fácies eólicas e as fácies praias são também facilmente mapeáveis, em que a radarfácies *Rf3ppe* sempre apresenta um padrão concordante de refletores em direção do oceano. O que se verifica é que quando correlacionadas a profundidade da interface eólica e praias no registro de georradar com o registro de compactação de uma única sondagem, as demais sondagens passam a confirmar esta correlação como um gabarito. Ou seja, os registros geofísicos e geotécnicos ajustam-se exatamente na interface eólico/praias nas demais sondagens.

CONCLUSÃO

Os dados apresentados no presente estudo confirmam a aplicabilidade de sondagens geotécnicas tipo SPT no ajuste de profundidade dos registros geofísicos GPR em áreas costeiras que exibam a interface de depósitos eólico/praias. No presente estudo, esta correlação foi estabelecida a partir dos registros de topo dos refletores *Rf3ppe*, sinalizando os depósitos praias a partir de sua geometria, enquanto a interface de compactação entre a fácies E e a fácies EP sinaliza a interface dos depósitos eólico/praias.

REFERÊNCIAS

Anthony, D., Moller, I. (2002). The geological architecture and development of the Holmsland Barrier and Ringkobing Fjord area, Danish North Sea Coast. *Geografisk Tidsskrift, Danish Journal of Geography*, 102(1), 27-36. <https://doi.org/10.1080/00167223.2002.10649463>

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) (2020). *NBR 6484 - Sondagem de simples reconhecimento com SPT - Método de ensaio*. Brasil: ABNT, 28 p. Disponível em: <https://www.abntcatalogo.com.br/pnm.aspx?Q=QUUpQNHFZWW1ibXpVV0dLV-zRHNnNkYXhTOVUwZnFVckNhaUgxKzZaSm1EQT0=>. Acesso em: 9 ago. 2023.

Bridge, J. S., Alexander, J., Collier, R. E. L., Gawthorpe, R. L., Jarvis, J. (1995). Ground-penetrating radar and coring used to study the large-scale structure of point-bar deposits in three dimensions. *Sedimentology*, 42(6), 839-852. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.1995.tb00413.x>

Bristow, C. S., Chroston, P. N., Bailey, I. D. (2000). The structure and development of foredunes on a locally prograding coast: insights from ground-penetrating radar surveys, Norfolk. *Sedimentology*, 47(5), 923-944. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3091.2000.00330.x>

DHN – Diretoria de Hidrografia Nacional (2011). Tábuas de maré. Disponível em: <http://www.mar.mil.br/dhn/chm/tabuas>. Acesso em: 11 nov. 2011.

Dillenburg, S. R., Barboza, E. G., Hesp, P. A., Rosa, M. L. C. C. (2011). Ground Penetrating Radar (GPR) and Standard Penetration Test (SPT) records of a regressive barrier in southern Brazil. *Journal of Coastal Research*, 64, 651-655. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/257525096_Ground_Penetrating_Radar_GPR_and_Standard_Penetration_Test_SPT_records_of_a_regressive_barrier_in_southern_Brazil. Acesso em: 13 mar. 2023.

Dillenburg, S. R., Roy, P. S., Cowell, P. J., Tomazelli, L. J. (2000). Influence of antecedent topography on coastal evolution as tested by the shoreface translation-barrier model (STM). *Journal Coastal Research*, 16, 71-81. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/4300012>. Acesso em: 9 ago. 2023.

Folk, R. L., Ward, W. C. (1957). Brazos River Bar: Study and significance of grain size parameters. *Journal Sedimentary Petrology*, 27(1), 3-26. <https://doi.org/10.1306/74D70646-2B21-11D7-8648000102C1865D>

- Gressly, A. (1837). Observations géologiques sur les terrains des chaînes jurassiques du Canton de Soleure, et des contrées limitrophes: Verhandlungen der allgemeinen Schweizerischen Gesellschaft für die Gesammten Naturwissenschaften, in ihrer einundzwanzigsten Jahresversammlung zu Solothurn, den 25, 26, 27 Juli 1836, Gedruckt bei Joseph Tschan, Solothurn. p. 126-132.
- Jol, H. M., Smith, D. G. (1991). Ground penetrating radar of northern lacustrine deltas. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 28(12), 1939-1947. <https://doi.org/10.1139/e91-175>
- Jol, H. M., Smith, D. G., Meyers, R. A. (1996). Digital ground penetrating radar (GPR): An improved and very effective geophysical tool for studying modern coastal barriers (examples for the Atlantic, Gulf and Pacific coasts, U.S.A.). *Journal of Coastal Research*, 12(4), 960-968. Disponível em: <http://www.jstor.org/stable/4298546>. Acesso em: 28 jun. 2023.
- Leatherman, S. P. (1987). Coastal geomorphic applications of ground penetrating radar. *Journal of Coastal Research*, 3(3), 397-399. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/4297315>. Acesso em: 28 jun. 2023.
- Lima, L. G., Albuquerque, S. S., Cerveira, G. S., Parise, C. K., Ferreira, M. S., Franco, B. J. (2020). Estratigrafia e Evolução de um Esporão Arenoso em Ambiente Macromaré: Ponta Da Areia - São Luís - Maranhão - Brasil. *Revista Geociências*, 39(4), 997-1008. <https://doi.org/10.5016/geociencias.v39i04.13993>
- Lima, L. G., Dillenburg, S. R., Medeanic, S., Barboza, E. G., Rosa, M. L. C. C., Tomazelli, L. J., Dehnhardt, B. A., Caron, F. (2013). Sea-level rise and sediment budget controlling the evolution of a transgressive barrier in southern Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 42, 27-38. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2012.07.002>
- Meyers, R. A., Smith, D. G., Jol, H. M. (1994). Ground penetrating radar investigation of the internal structure of a Pacific coast barrier spit. *Abstracts...*, 26, 69.
- Murakoshi, N., Masuda, F. (1991). A depositional model for a flood tidal delta and washover sands in the late Pleistocene Paleo-Tokio Bay, Japan. In: Reinson, G. E., Zaitlin, B. A., Rahmani, R. A. (Eds.), *Clastic Tidal Sedimentology*, 16, 219-226.
- Neal, A., Richards, J., Pye, K. (2003). Sedimentology of coarse clastic beach ridge deposits, Essex, Southeast England. *Sedimentary Geology*, 162(3-4), 167-198. [https://doi.org/10.1016/S0037-0738\(03\)00136-2](https://doi.org/10.1016/S0037-0738(03)00136-2)
- Neal, A., Roberts, C. L. (2000). Applications of ground-penetrating radar (GPR) to sedimentological, geomorphological and geoarchaeological studies in coastal environments. *Geological Society, London, Special Publications*, 175(1), 139-171. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2000.175.01.12>
- Nishi, R., Ohmi, S., Sato, M., Uda, T., Kraus N. C. (1996). Compaction of beaches and dunes. *Proceedings of Coastal Engineering*, 43, 681-685.
- Paz, C., Alcalá, F. J., Carvalho, J. M., Ribeiro, L. (2017). Current uses of ground penetrating radar in groundwater-dependent ecosystems research. *Science of the Total Environment*, 595, 868-885. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.03.210>
- Porsani, J. L. (1999). *Ground Penetrating Radar (GPR): Proposta metodológica de emprego em estudos geológico-geotécnicos nas regiões de Rio Claro e Descalvado - SP*. Tese (Doutorado). Rio Claro: Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Unesp, 145 p.
- Schwartz, R. K. (1975). Nature and genesis of some storm washover deposits. *CERC Technical Memorandum 61*. U.S. Army Corps of Engineers, 69 p. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2216.9449>
- Schwartz, R. K. (1982). Bedform and stratification characteristics of some modern small-scale washover sand bodies. *Sedimentology*, 29(6), 835-849. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.1982.tb00087.x>
- van Overmeeren, R. A. (1998). Radar facies of unconsolidated sediments in The Netherlands: a radar stratigraphy interpretation method for hydrogeology. *Journal of Applied Geophysics*, 40(1-3), 1-18. [https://doi.org/10.1016/S0926-9851\(97\)00033-5](https://doi.org/10.1016/S0926-9851(97)00033-5)
- Stern, W. (1929). Versuch einer elektrodynamischen Dickenmessung von Gletschereis. *Gerlands Beiträge zur Geophysik*, 23, 292-333.