

PROSPECÇÃO GEOFÍSICA E GEOTÉCNICA NO SÍTIO DE IMPLANTAÇÃO DO COLOMBO'S RESORT, PORTO SANTO

GEOPHYSICAL AND GEOTECHNICAL EXPLORATION OF THE COLOMBO'S RESORT, PORTO SANTO

Almeida, Fernando, *Universidade de Aveiro, Portugal, falm@geo.ua.pt*
Silva, João, *MIA (C.Inv.), Universidade de Aveiro, Portugal, madeirarochas@netmadeira.com*
Machado, Duarte, *Geosonda,Lda, Portugal, geosonda@geosonda.net*
Moura, Ricarda, *Geosonda,Lda, Portugal, geosonda@geosonda.net*
Hermosilha, Hélder, *Universidade de Aveiro, Portugal, info@geosurveys.pt*
Rocha, António, *Sigologia,Lda, Portugal, sigologia@sapo.pt*
Gomes, Celso, *MIA (C.Inv.), Universidade de Aveiro, Portugal, cgomes@geo.ua.pt*

RESUMO

O presente trabalho evidencia a importância dos estudos geofísicos de caracterização de sítio, envolvendo prospecção geoelectrica e prospecção de georadar, como suporte aos estudos geotécnicos para projectos de implantação de determinadas infra-estruturas. O caso de estudo foi o sítio seleccionado para implantação do Conjunto Turístico Colombo's Resort, na ilha do Porto Santo, arquipélago da Madeira. Tendo por base a informação geológica do local e o modelo geofísico previamente elaborado definindo várias unidades estruturais/composicionais, foram programados os locais para execução de ensaios geotécnicos de penetração mecânica dos tipos ligeiro (PDL) e super pesado (DPSH) além de poços de inspecção, que permitiram determinar o parâmetro geotécnico resistência dinâmica de ponta.

ABSTRACT

The present paper intends to show the importance of the contribution of geophysical site characterization involving geoelectric and georadar surveys, as support to the standard geotechnical studies required for the construction project of certain infra-structures. The case study was developed at the site selected for the construction of the Complex Colombo's Resort, located in the island of Porto Santo, Madeira archipelago. Based on the geological information available for the site and the geophysical model previously established that allowed the definition of several structural/compositional units, the places to carry out the geotechnical tests of mechanical penetration (DPL,DPSH) and to open inspection pits have been selected. The geotechnical parameter dynamic tip resistance required for shallow foundation projects was also determined.

1. INTRODUÇÃO

A aplicação de métodos geofísicos na caracterização de sítio, casos da prospecção geoelectrica e da prospecção de georadar, revelou-se muito importante como suporte aos estudos geotécnicos que foram realizados tendo em vista a preparação do projecto de construção do Conjunto Turístico Colombo's Resort, promovido pelo Grupo SIRAM, SGPS, S.A., no local denominado Campo de Baixo, na Ilha do Porto Santo, Arquipélago da Madeira (Silva *et al.*, 2002). A caracterização de sítio efectuada, além de fornecer informação para apoiar o cálculo das fundações, também foi importante para planear a execução de poços e galerias de captação de água salgada.

A área de terrenos estudada, situa-se na zona sul da ilha, abrange 170.000 m², aproximadamente e estende-se desde a duna primária ou frontal até ao sopé do Pico de Ana Ferreira. A referida área é atravessada pela estrada regional principal que liga a cidade do Porto Santo à zona da Calheta, sendo no núcleo situado a sul desta estrada que se desenvolverá quase a totalidade do empreendimento turístico.

As formações geológicas, sobre as quais o conjunto turístico se vai edificar, estão representadas na Carta Geológica de Portugal, folha da ilha do Porto Santo à escala 1/25000 (Ferreira e Neiva, 1996), por cinco manchas de contorno irregular, que se estendem desde a costa, entre o Cabeço da Ponta e a foz do Ribeiro Salgado, e se prolongam para o interior abrangendo a encosta SE do Pico de Ana Ferreira, (Fig.1). As referidas manchas cartografadas estão assinaladas na carta pelas designações: Q1 e Q2 (Depósitos de praia com orientação N 47° paralela à linha de costa), Ec (Eolianitos calcoareníticos), P (Paleosolos silto-argilosos preenchendo depressões com orientação N 62° a N 72°), todas do Quaternário, e dV (Escoadas de hialoclastitos e depósitos vulcanoclásticos submarinos) do Miocénico Médio.

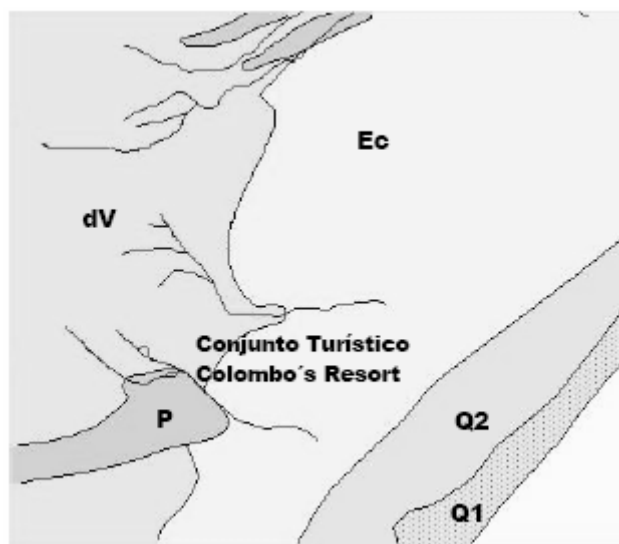


Figura 1 – Excerto da Carta Geológica de Portugal, folha da ilha do Porto Santo (adaptado de Silva et al, 2002)

Em termos litológicos, o núcleo norte, apresenta relevo ravinado de pente acentuada, sendo constituído, essencialmente, por eolianitos calcoareníticos e crostas calcárias ocorrendo ainda materiais vulcânicos clásticos fazendo parte de depósitos de vertente, enquanto o núcleo sul, apresenta relevo mais aplanado, sendo constituído, essencialmente, por areias carbonatadas de origem biogénica, quer móveis, quer mais ou menos consolidadas por efeito de diagénese, que em meio sub-aéreo, produziu a denominada formação eolianitos calcoareníticos e em meio aquático produziu o chamado *beach rock* (designado localmente por *lagedo*), e ainda lodos argilo-carbonatados sob a forma de materiais de grão fino depositados em pequenas bacias desenvolvidas nos depósitos de areia (Silva, 2002).

Para a caracterização de sítio na sua vertente geotécnica procedeu-se à execução de ensaios de penetração dinâmica super pesada (DPSH), ensaios de penetração ligeira (PDL) e poços de inspeção (V) (Fig.2).

Toda a informação recolhida, depois de selectivamente tratada, processada e interpretada em ambiente SIG, facultou, por um lado, a execução do projecto de prospecção e, por outro lado, a apresentação dos resultados.



Figura 2 – Localização dos trabalhos de prospecção geofísica e geotécnica (adaptado de Silva et al, 2002)

2. PROSPECÇÃO GEOFÍSICA

Na caracterização de sítio empregaram-se dois métodos de prospecção geofísica: resistividade eléctrica e georadar. A utilização destes métodos teve em consideração a aplicação criteriosa dos mesmos. No núcleo norte, onde fundamentalmente ocorrem crostas calcárias e eolianitos calcoareníticos, utilizou-se o georadar com antenas de 500 MHz para estabelecer um zonamento do enchimento das formas de ravinação mais antiga que é constituído por materiais inconsolidados do depósito de vertente. No núcleo Sul, referente à zona deposicional de sedimentos, as profundidades de investigação exigidas eram maiores; nesse sentido foi utilizado o método da resistividade eléctrica para obter um modelo do subsolo de modo a guiar a localização das intervenções geotécnicas (ensaios de penetração e valas de inspecção) e suportar o conhecimento hidrogeológico junto à linha de costa.

2.1 Resistividade eléctrica

A prospecção geoelectrica foi realizada através da execução de seis perfis (Fig.2) utilizando o dispositivo de medida dipolo-dipolo com espaçamento entre eléctrodos de cinco metros. A amostragem foi executada com o resistivímetro R1 PLUS switch 72 da IRIS Instruments. Este resistivímetro é composto por um subsistema de comutação que configura de forma automática a disposição dos eléctrodos de corrente e de potencial permitindo uma aquisição rápida dos dados. No seu conjunto o equipamento é composto por um resistivímetro e 4 cabos multicondutores (cada um com 90 metros, que permitem realizar perfis com diversas extensões com base na técnica *roll-along*). O processamento efectuado apoiou-se na técnica de inversão geofísica desenvolvida por Loke and Barker (1996), que transforma as pseudo-secções de

resistividade aparente (dados de campo) em secções da distribuição de resistividades (modelo teórico inverso). Os dados foram processados no programa RES2DINV que executa a inversão e exporta ficheiros ASCII (*.xyz) integráveis em ambiente SIG. Na figura 3 apresenta-se, a título de exemplo, a caracterização de sítio, suportada em modelo de resistividade obtido para o perfil P1 que é perpendicular à linha de costa, sobreposta com informação geotécnica, arquitectónica e hidrogeológica interpretativa.

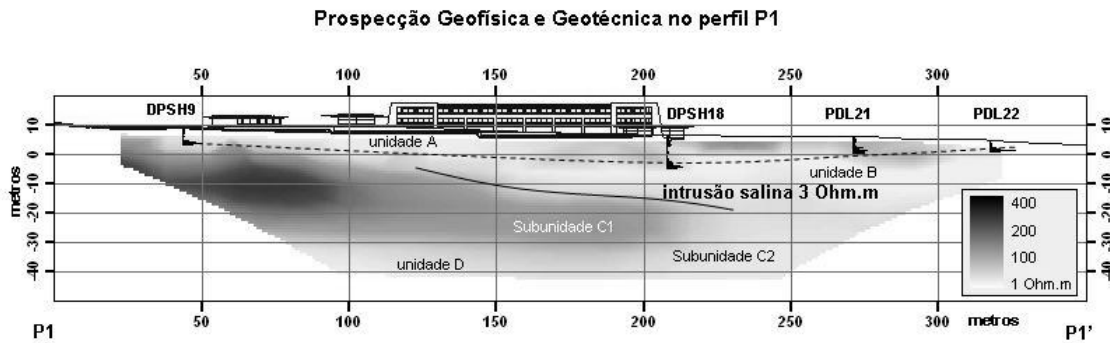


Figura 3 – Modelo de resistividade eléctrica, ensaios de penetração dinâmica e interpretação.

A linha a tracejado representa o topo do substrato resistente, enquanto a linha a cheio corresponde ao limite interpretado para a intrusão salina. (adaptado de Silva et al, 2002)

2.1.1 Interpretação geoelectrica

A interpretação obtida nos modelos de inversão identificou limites entre áreas de resistividade distinta, resultantes das propriedades físicas do terreno, tais como porosidade, grau de humidade, granulometria e salinidade. Os limites interpretados sobre os modelos geoelectricos definidos entre zonas de diferente resistividade permitem estabelecer as unidades geoelectricas, apresentadas esquematicamente na figura 4 e identificadas no perfil P1 (fig. 3).

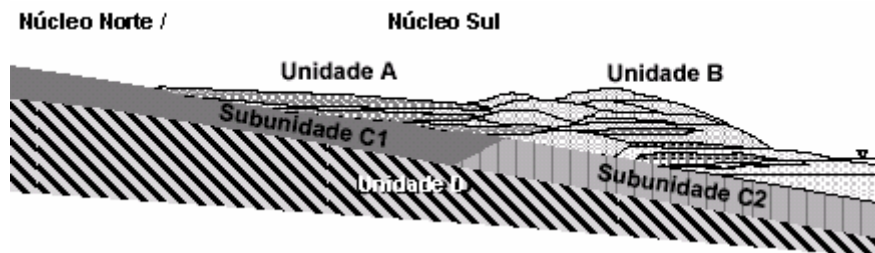


Figura 4 – Modelo geoelectrico da área estudada. (adaptado de Silva et al, 2002)

Unidade A: unidade superficial, situada entre a estrada da Calheta e a duna secundária, é caracterizada por valores de resistividade inferiores a 34 ohm.m, podendo corresponder, segundo a cartografia geológica à formação de Paleosolos silto-argilosos conferindo assim a presença de baixas resistividades.

Unidade B: unidade superficial, localizada entre a duna secundária e a linha de costa, é caracterizada por valores médios de resistividade da ordem de 265 ohm.m. Esta unidade, segundo a cartografia geológica é formada por depósitos de praia constituídos por areias com diferentes granulometrias e graus de humidade, incluindo por vezes alguns níveis silto-argilosos.

Unidade C: Esta unidade é definida por uma gama larga de valores de resistividade, permitindo assim diferenciar as seguintes subunidades:

Subunidade C1: caracterizada por valores de resistividade superiores a 90 ohm.m. Esta subunidade estará associada à formação de eolianito calcoarenítico cimentado; o topo desta subunidade encontra-se em todos os modelos de inversão a cotas superiores às do nível médio do mar; o limite inferior não foi determinado em consequência de não se visualizar nenhuma descontinuidade nos valores de resistividade;

Subunidade C2: caracterizada por valores de resistividade inferiores a 40 Ohm.m, esta subunidade poderá estar relacionada com um eolianito calcoarenítico, impregnado por água cuja concentração salina aumenta em direcção à orla costeira. O Perfil P4, realizado numa depressão entre as dunas primária e secundária (Fig.2), apresenta uma distribuição de resistividades para cotas inferiores a zero metros a partir da qual se estimou o valor mais provável de 3 Ohm.m referente à maior ocorrência (Fig.5). Associado a esta subunidade, assume-se que valores de resistividade de 3 Ohm.m se explicam pela influência da intrusão salina.

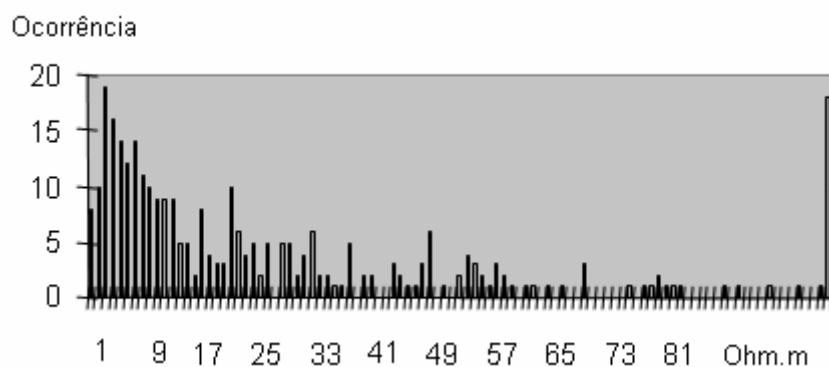


Figura 5 – Distribuição da resistividade para cotas inferiores a zero no perfil P4 paralelo à linha de costa

Para explicar a subdivisão efectuada na unidade C foi usado um modelo físico das rochas baseado na equação de Winsaeur (Orellana, 1982).

$$\rho_{rocha} = \rho_{\acute{a}gua} aP^{-m} \quad (1)$$

Considerou-se o parâmetro de cimentação $m= 1,7$ característico de rochas sedimentares bem cimentadas incluindo arenitos e calcários e o parâmetro $a=0,9$ dependente da textura da rocha sedimentar bem cimentada (Orellana, 1982). Estimou-se para a resistividade da rocha (ρ_{rocha}) o valor médio de 3 ohm.m obtido pela análise do histograma da figura 5 e para o valor da resistividade ($\rho_{\acute{a}gua}$) do electrólito o valor 0,205 ohm.m, obtido em medidas da água do mar no Porto Santo (Silva, 2002). Obteve-se da expressão (1) uma porosidade (P) igual a 20,5% que é função de uma série de parâmetros arbitrados com origem na bibliografia e nos resultados invertidos para a resistividade eléctrica no perfil P4 junto à linha de costa. A medição da porosidade efectuada em laboratório de uma amostra de eolianito calcoarenítico, do Núcleo Norte permitiu por via experimental obter um valor de porosidade igual a 25%. Como as porosidades obtidas com base no modelo de Winsaeur (Orellana, 1982) e por via experimental são sensivelmente idênticas, depreende-se que as formações associadas à subunidade C2 sejam eolianitos calcoareníticos impregnados por água do mar. A porosidade e a resistividade da água encontradas são importantes dados para o planeamento da captação de água salgada.

Unidade D: Unidade mais profunda e subjacente à unidade C é caracterizada por uma grande variação dos valores de resistividade. Esta unidade segundo a geologia poder-se-á atribuir a formações vulcânicas constituídas por escoadas de hialoclastitos e depósitos vulcanoclasticos. Observa-se em todos os perfis uma diminuição da resistividade em profundidade que poderá

estar relacionado com uma mudança de litologia, nomeadamente, entre a formação de escoadas de hialoclastitos, mais resistivas, e depósitos vulcanoclásticos porosos, mais condutores. O tecto desta unidade só é definido quando se verifica alguma variabilidade no parâmetro geofísico resistividade, entre esta unidade e a subunidade subjacente (C2).

2.2 Georadar

No núcleo norte, onde fundamentalmente ocorrem crostas calcárias e eolianitos calcoareníticos, utilizou-se o georadar (RAMAC/MALA) com antenas de 500 MHz para estabelecer um zonamento do enchimento das formas de ravinação mais antiga que são formadas por materiais inconsolidados do depósito de vertente. As antenas de georadar foram seleccionadas tendo em conta o tipo de terreno e os objectivos pretendidos. O estudo de prospecção por georadar teve como objectivo obter informação em profundidade das formações geológicas (Paleosolos silto-argilosos e eolianitos calcoareníticos) que ocorrem na parte superior do terreno, detectar possíveis antigas depressões e respectivas estruturas de preenchimento. As possíveis estruturas de paleocanais estariam à partida localizadas em zonas pouco profundas das formações geológicas, mas de extrema importância para a implantação das fundações do edificado.

2.2.1 Metodologia de Campo

Utilizou-se um Georadar com frequência central de 500 MHz, que funciona em modo biestático, ou seja, é composto por uma antena emissora e por uma antena receptora. A técnica consiste na emissão de um pulso electromagnético com o lóbulo principal dirigido na vertical e no sentido do terreno, que ao “viajar” pelo solo é reflectido quando existem interfaces entre meios de propriedades dieléctricas diferentes, e difractado caso existam objectos pontuais de propriedades dieléctricas contrastantes com o meio que os rodeia. A frequência utilizada permite a discretização de níveis espaçados entre 0,05m e 0,1m e a profundidade de investigação é condicionada pelas propriedades dieléctricas do terreno.

De uma forma geral, os meios com elevada composição argilosa provocam um efeito de atenuação do sinal electromagnético, devido à sua elevada condutividade eléctrica. Cada posição de leitura consiste na soma de 32 impulsos que é representada no tempo de ida e volta; construindo-se, deste modo, uma secção vertical em função da distância percorrida ao longo do perfil. Este tempo de ida e volta pode ser convertido em profundidade tendo em consideração a velocidade média de propagação do pulso electromagnético no terreno. A estima da velocidade pelo ajuste de hipérbolas de difracção forneceu o valor de 0,1m/ns.

A aquisição foi efectuada de modo contínuo e referida a marcas de controlo de 10 em 10 metros. Para cada perfil adquiriram-se dados em duas janelas temporais diferentes: uma de 47ns (2,35 metros de profundidade) e outra de 84ns (4,2 metros de profundidade). Estas duas janelas de aquisição surgiram da necessidade de garantir que não se perderia resolução superficial, na tentativa de obter informação em profundidade (janela temporal mais elevada, 84ns). Os perfis foram implantados no terreno (Fig.2) de modo a cobrir a base do maior número de edifícios planeados e com direcção perpendicular às linhas de maior declive onde provavelmente ocorreram linhas de água ou depressões originadas por ravinação.

2.2.2. Processamento e Interpretação

Os perfis foram sujeitos a várias fases de processamento que consistiram em: reamostragem espacial dos perfis, de modo a efectuar as correcções relativas às marcas de controlo; filtragem

de gamas de frequências que constituíam fonte de ruído e correcção topográfica dos perfis para incorporar informação altimétrica.

A interpretação passou por duas fases distintas. Na primeira fase, com maior alcance em profundidade, foram assinaladas interfaces visíveis (linhas evidenciadas a negro no exemplo da figura 6) nos radargramas. O padrão estrutural complexo evidenciado foi interpretado como resultante da presença de dunas fósseis. Como a separação entre perfis é superior a 30m e a profundidade máxima de investigação foi de 2m, não foi efectuada a correlação lateral das estruturas interpretadas. Na segunda fase interpretaram-se os perfis mais superficiais (profundidade de investigação 2,35 metros): Neste caso optou-se apenas por assinalar as interfaces mais significativas (linhas a negro na figura7) dos radargramas. Uma vez que estes perfis têm maior resolução espaço-temporal (maior número de traços e maior número de amostras no tempo) é possível distinguir melhor as estruturas “principais” (estruturas que originam reflexões de elevada amplitude de sinal).

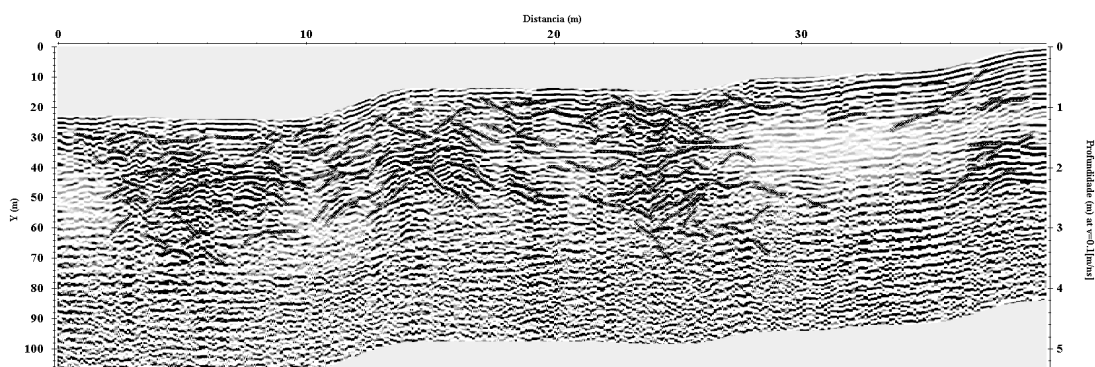


Figura 6 – Radargrama do perfil 102S, com a janela de tempo de 84ns.

Note-se o entrecruzamento dos reflectores característico de uma formação dunar evidenciado pela sobreposição (a negro) dos reflectores interpretados (adaptado de Silva et al, 2002).

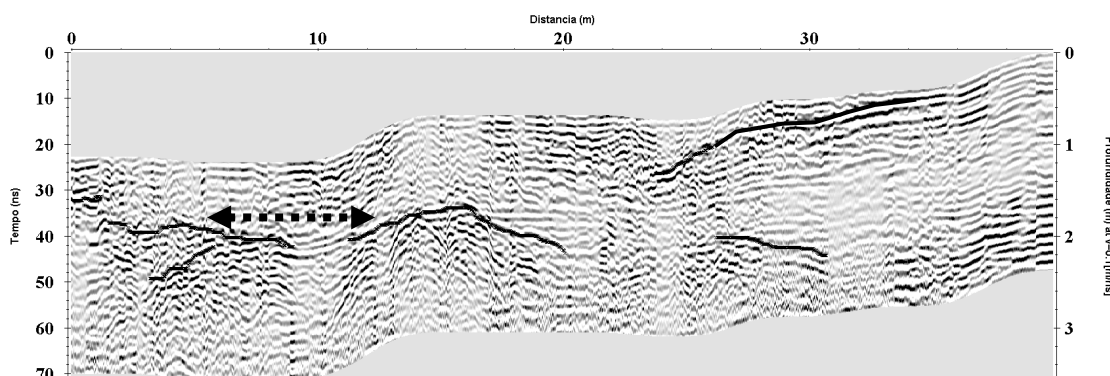


Figura 7 – Radargrama do perfil 102S, com a janela de tempo de 47ns. Sobreposto (a negro) estão identificados os reflectores principais interpretados e a tracejado surge a interpretação de um paleocanal (adaptado de Silva et al, 2002).

Deste modo definiram-se dois tipos de estruturas. As primeiras são: estruturas internas da duna fóssil associáveis a níveis de crostas calcárias resistentes à erosão e que se verificou estarem ligadas aos afloramentos das mesmas (níveis sobrepostos a negro na Fig.6). As segundas são: Paleoestruturas (antigos canais) de erosão que permitiram definir uma área relacionada com uma rede de drenagem (indicadas na Fig.7 por seta com linha a tracejado).

Após a interpretação dos radargramas e por observação das valas de inspecção estabeleceu-se um zonamento em planta. Assim, emergem três zonas distintas no núcleo norte prospectado por Georadar (Fig.8) que se passam a descrever:

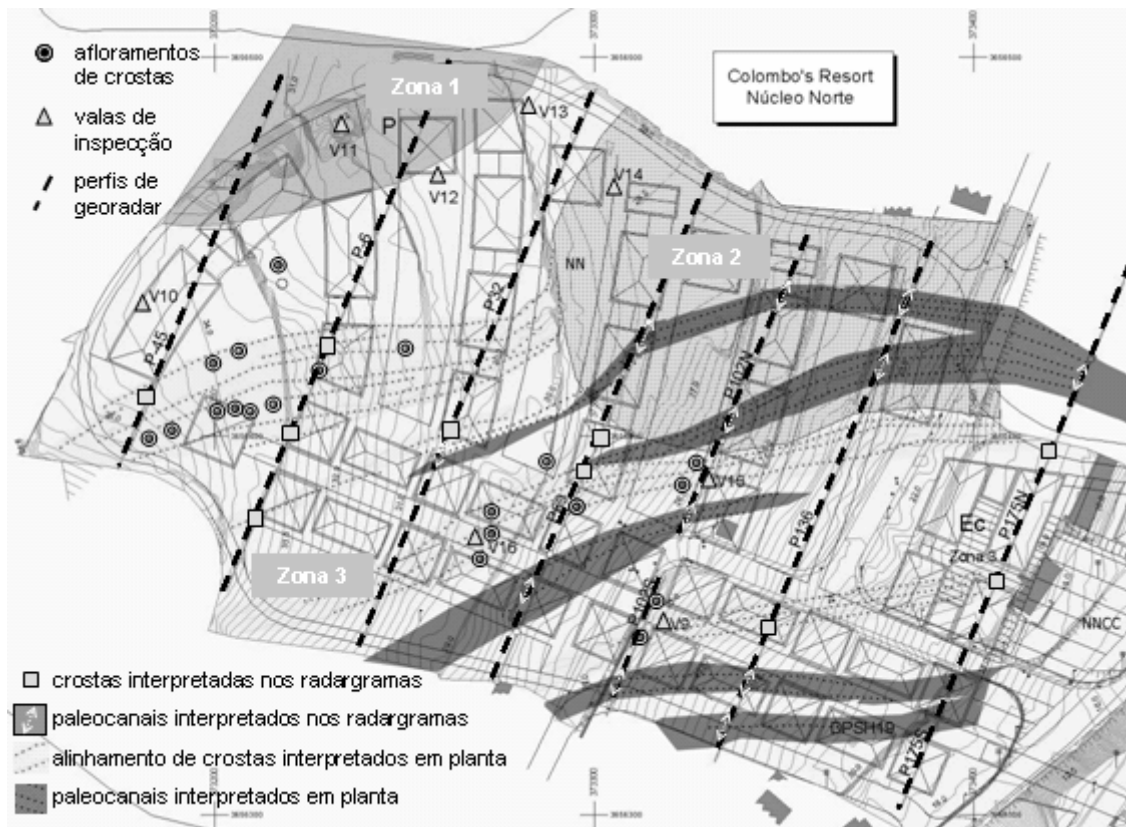


Figura 8 – Planta interpretativa com zonamento no núcleo Norte (adaptado de Silva et al, 2002).

Zona 1 – Formação de paleossolos silto-argilosos que preenchem uma depressão na formação dos eolionitos calcoareníticos. A base do paleosolo evolui em profundidade desde o limite interpretado até atingir a cota de 28,9m como foi possível verificar na vala V11 (Fig.8).

Zona 2 – A definição desta zona apoia-se na informação obtida na vala V14 e na interpretação de um padrão de drenagem suportado pelos paleocanais colmatados resultantes do modelo obtido por georadar (Fig.8). A direcção desse alinhamento interpretado em planta (pontado em fundo escuro) é aproximadamente N70° idêntica ao alinhamento local dos paleossolos (Fig.1). É de esperar que as crostas de calcário sejam muito finas ou inexistentes. A menor incidência de crostas nesta zona pode ser explicada quer por um desmonte da rocha para a construção dos muros de suporte existentes na zona, quer por ter origem geológica relacionada com uma camada de areias idênticas às da vala V14. As profundidades destes paleocanais não ultrapassam 1m e têm largura variável.

Zona 3 – Esta zona (Fig.8) é complementar das duas zonas anteriores, e a probabilidade de nela ocorrerem crostas calcárias até 1m de profundidade é muito elevada apesar de existirem alguns pequenos paleocanais colmatados, cuja profundidade é menos pronunciada do que na Zona 2. Ocorrem ainda afloramentos de crostas calcárias que foram associados a um zonamento mais fino representado pelas linhas ponteadas em fundo claro com uma orientação aproximada N70°. Estas encontram-se espacialmente relacionadas com a projecção à superfície (quadrados) dos níveis sub-horizontais interpretados nos radargramas.

O zonamento resultante da prospecção por georadar conjuntamente com os dados da cartografia geológica, informação dos ensaios laboratoriais e valas de inspecção forneceu informação para o projecto de fundações.

3. PROSPECÇÃO GEOTÉCNICA

Na prospecção geotécnica executaram-se dois tipos de ensaios de penetração dinâmica (21 DPSH e 22 PDL) além de poços de inspecção (V).

A localização dos ensaios (Fig.2) foi estabelecida em função da implantação das construções planeadas e do modelo geofísico previamente elaborado. Os poços de inspecção permitiram observar e amostrar os materiais geológicos para efectuar ensaios geotécnicos laboratoriais em solos e rochas (análise granulométrica, limites de Atterberg, corte directo, expansibilidade, compressão uniaxial e permeabilidade) enquanto os ensaios de penetração forneceram informação sobre a resistência dinâmica das formações atravessadas.

Como é do conhecimento geral, os ensaios de penetração dinâmica consistem na determinação do número de pancadas necessário para que ocorra determinado comprimento de penetração. Dado que no trabalho foram utilizados dois equipamentos (PDL e DPSH), foi necessário transformar os dados de campo num parâmetro comparável dentro dos limites de cada ensaio. Assim, foi calculada a resistência dinâmica de ponta através da denominada “fórmula dos Holandeses” (Sanglerat, 1972).

Com a prospecção geofísica minimizou-se o número de ensaios geotécnicos e foi possível interpretar o topo do substrato resistente ilustrado na figura 3. Partindo desta caracterização dinâmica e do conhecimento litológico/geotécnico das formações, forneceu-se informação fundamental para o projecto de fundações.

4. CONCLUSÕES

A utilização de métodos de prospecção geofísica, geoelectrica e de georadar, constituiu uma contribuição complementar muito útil para seleccionar os locais onde foram realizados os ensaios geotécnicos de penetração dinâmica ligeira e pesada, necessários para o desenvolvimento do projecto da construção do Conjunto Turístico Colombo's Resort, na ilha do Porto Santo, a implantar em terrenos sedimentares, essencialmente arenosos, pouco contrastantes, e de formação relativamente recente.

Do ponto de vista da caracterização de sítio, efectuada através de duas abordagens técnicas (geofísica/geotécnica), realça-se a semelhança entre o zonamento geotécnico e o modelo geoelectrico. Deste facto, sem perder informação lateral extrapolável através do modelo geoelectrico, foi possível minimizar o número de ensaios de penetração que serviram de base ao projecto das fundações. Por outro lado, o modelo geoelectrico também suporta o projecto relativo à execução dos poços e galerias de captação de água salgada.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos administradores do Grupo SIRAM, SGPS, S. A., Dr. Sílvio Santos e Eng. Luís Severim, promotores e financiadores dos estudos, a autorização concedida para a utilização de dados e apresentação parcial dos trabalhos de engenharia desenvolvidos no Conjunto Turístico Colombo's Resort.

6. REFERÊNCIAS

Ferreira, M.; Neiva, J. (1996) – *Carta geológica de Portugal*. Centro de geociencias da Universidade de Coimbra, Instituto Geológico e Mineiro

Sanglerat, G. (1972) – *The penetrometer and soil exploration: interpretation of penetration diagrams - theory and practice* Elsevier Publishing Co., Amsterdam

Loke, M.; Barker, R. (1996) – *Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections using a quasi-Newton method*. Geophysical Prospecting, 44, 131-152.

Orellana, E. (1982) – *Prospeccion Geoelectrica en corriente continua*. Paraninfo, Madrid.

Silva, J.; Machado, A.; Moura, R.; Hermosilha, H.; Rocha, A. (2002) – *Estudos de prospecção geotécnica, geofísica e hidrogeológica, tendo em vista a construção do Conjunto Turístico – Colombo's Resort, ilha do Porto Santo, arquipélago da Madeira*. EnGeoMad – Planeamento e Gestão de Recursos Naturais, Funchal, 56 pp.

Silva, J. (2002) – *Areia de praia da ilha do Porto Santo: geologia génese, dinâmica e propriedades medicinais*. Dissertação de doutoramento, Universidade de Aveiro, Aveiro, pp. 276.