

PROSPECÇÃO DE RADAR DE PENETRAÇÃO DE SOLO (GPR) NA CATEDRAL DE PARANAGUÁ, PARANÁ, BRASIL

Rafael Espíndola Canata¹; Antonio Carlos Mathias Cavalheiro²;
Letícia Nardi¹; Tarciane Domanski¹; Daniel Costetti¹; Alessandra de Barros e Silva Bongioio¹

1 – Universidade Federal do Paraná/Laboratório de Pesquisa em Geofísica Aplicada. 2- EPPc Estudos e Projetos em Patrimônio Cultural LTDA 3- Inspire-C Arquitetura. E-mail: mail1 : rafaelcanata@gmail.com. Mail2: antonio.eppc@gmail.com. Mail3: leticia@inspire-c.com. Mail4: tarcianedomanski@ufpr.br Mail5: costettidaniel@ufpr.br Mail6: alebongioio@ufpr.br

Resumo: A prospecção geofísica, especialmente por meio do Ground Penetrating Radar (GPR), tem ampla aplicação na arqueologia devido à sua capacidade de detectar e mapear estruturas e artefatos enterrados de forma não destrutiva. Essa técnica permite identificar fundações, paredes, túmulos, estradas antigas e objetos metálicos ou cerâmicos, sendo uma ferramenta auxiliar para o planejamento de escavações e a preservação do patrimônio cultural. Neste trabalho, o GPR foi empregado para mapear as estruturas da Catedral Diocesana de Paranaguá, com o objetivo de investigar modificações arquitetônicas ocorridas ao longo do tempo para a compreensão do contexto histórico local. O método aplicado é não invasivo e possibilita a diferenciação dos materiais presentes nas estruturas internas e externas, bem como a identificação de possíveis sepultamentos. Utilizou-se o equipamento GPR SIR3000, acoplado com antenas de 400 MHz e 900 MHz. As seções 2D foram adquiridas em modo constant offset com registro contínuo por roda odométrica. As áreas foram subdivididas em interna, externa e do pátio para facilitar a aquisição e o processamento de volumes de dados 3D. Os resultados 2D permitiram diferenciar tijolos e seixos nas paredes, identificar uma camada associada ao antigo confessionário e investigar indícios de sepultamentos na calçada. Já os dados 3D evidenciaram zonas anômalas relacionadas a materiais rochosos entre sedimentos ou estruturas possivelmente escavadas. Foram identificadas anomalias atrás do altar e no pátio externo que podem estar ligadas a sepultamentos, além da diferenciação de materiais nas paredes e do mapeamento do confessionário, destacando o potencial do GPR como ferramenta de investigação arqueológica e arquitetônica.

Palavras-chave: GPR; catedral; prospecção geofísica; arqueologia.

Abstract: Geophysical prospection, particularly through Ground Penetrating Radar (GPR), has wide application in archaeology due to its ability to detect and map buried structures and artifacts in a non-destructive manner. This technique enables the identification of foundations, walls, tombs, ancient roads, and metallic or ceramic objects, making it an help tool for excavation planning and cultural heritage preservation. In this study, GPR was employed to map the structures of the Diocesan Cathedral of Paranaguá with the aim of investigating architectural modifications over time and contributing to the understanding of the site's historical context. The applied method is non-invasive and allows for the differentiation of materials within internal and external structures, as well as the identification of potential burials. The GPR SIR3000 system was used, equipped with 400 MHz and 900 MHz antennas. The 2D sections were acquired in constant offset mode with continuous trace recording using an odometer wheel. The internal, external, and courtyard areas were subdivided into smaller zones to facilitate data acquisition and the processing of 3D data volumes. The 2D results enabled the differentiation of bricks and pebbles in the walls, the identification of a layer associated with a former confessional, and the investigation of burial evidence in the sidewalk area. The 3D data revealed anomalous zones related to rocky material within sediments or possibly excavated structures. Anomalies detected behind the altar and in the external courtyard may be associated with burials. Additionally, the differentiation of wall materials and the mapping of the confessional highlighted the potential of GPR as a tool for archaeological and architectural investigation.

Keywords: GPR; cathedral; geophysical prospecting; archaeology.

INTRODUÇÃO

Investigar construções históricas centenárias representa um desafio para a arqueologia, especialmente em contextos urbanos onde edificações antigas coexistem com a ocupação moderna. Muitas dessas construções passaram por sucessivas reformas, ampliações e alterações estruturais ao longo do tempo, o que torna difícil compreender sua configuração original apenas por meio de análises de superfície. Além disso, essas estruturas podem estar associadas a práticas culturais específicas, como sepultamentos ou áreas de uso religioso, cujos vestígios permanecem soterrados ou incorporados às camadas arquitetônicas.

A arqueologia dispõe de diversas ferramentas para investigar esses contextos, como análises documentais, escavações estratigráficas, mapeamentos arquitetônicos e o uso de tecnologias não invasivas. Dentre essas, destaca-se a prospecção geofísica como uma metodologia complementar que permite investigar o subsolo e as estruturas ocultas sem a necessidade de escavação direta. Essa abordagem é particularmente valiosa em locais de relevância histórica e cultural, nos quais intervenções devem ser evitadas ou minimizadas. Entre os métodos geofísicos aplicados à arqueologia, destacam-se a eletrorresistividade, a magnetometria e o radar de penetração no solo (*Ground Penetrating Radar* – GPR). Cada um desses métodos possui características específicas, sendo adequados conforme os objetivos da investigação, as condições do terreno e os tipos de materiais a serem detectados. O GPR, em particular, tem se mostrado altamente eficaz em ambientes urbanos e edificações históricas devido à sua alta resolução espacial, capacidade de gerar imagens bidimensionais (2D) e tridimensionais (3D) da subsuperfície, além da aquisição rápida de dados em tempo real.

Diversos estudos têm demonstrado o potencial do GPR em contextos arqueológicos. Conyers

(2004, 2006, 2012) e Conyers e colaboradores (Conyers & Goldman 1997; Conyers & Leckebusch 2010) relatam aplicações bem-sucedidas na identificação de fundações, sepultamentos, estradas antigas e estruturas ocultas em sítios históricos nos Estados Unidos e Europa. Zhao *et al.* (2013) aplicaram o método em templos budistas na China, obtendo imagens claras de pavimentos e muros soterrados. Allen *et al.* (2017) exploraram uma missão jesuítas na Argentina, utilizando GPR para mapear estruturas subterrâneas com precisão. Apesar de sua eficácia, o método apresenta limitações, especialmente em terrenos altamente argilosos ou com forte presença de umidade, que podem atenuar o sinal e comprometer a resolução dos dados.

Em investigações de paredes de edificações os trabalhos de Barraca *et al.* (2019) e De Giorgi *et al.* (2021) demonstram a eficiência do método em obter informações sobre construções anteriores, criptas, e outras edificações, indispensáveis para contribuir para a preservação, recuperação e reabilitação de monumentos.

Neste contexto, o presente estudo teve como objetivo utilizar o GPR na investigação da Catedral Diocesana de Paranaguá (PR), uma edificação histórica de relevância religiosa e cultural. Buscou-se, por meio dessa abordagem, identificar possíveis modificações arquitetônicas ao longo do tempo, distinguir diferentes tipos de materiais utilizados nas estruturas internas e externas, e averiguar a existência de sepultamentos ou outras anomalias arqueológicas no subsolo da área, fatos conhecidos através de relatos históricos em documentos da própria catedral. A combinação de dados 2D e 3D possibilitou uma compreensão abrangente da configuração estrutural da catedral, contribuindo para a preservação do patrimônio e para o entendimento de sua evolução histórica.

Área de Estudo

A Catedral Diocesana, localizada no município de Paranaguá-PR conforme mostra a Figura 1, oferece uma excelente oportunidade para apli-

cação do GPR para desvendar de forma indireta as modificações arquitetônicas realizadas ao longo dos anos, devido às diferentes fases de construção e reformas que teve ao longo dos anos desde o início da sua construção.

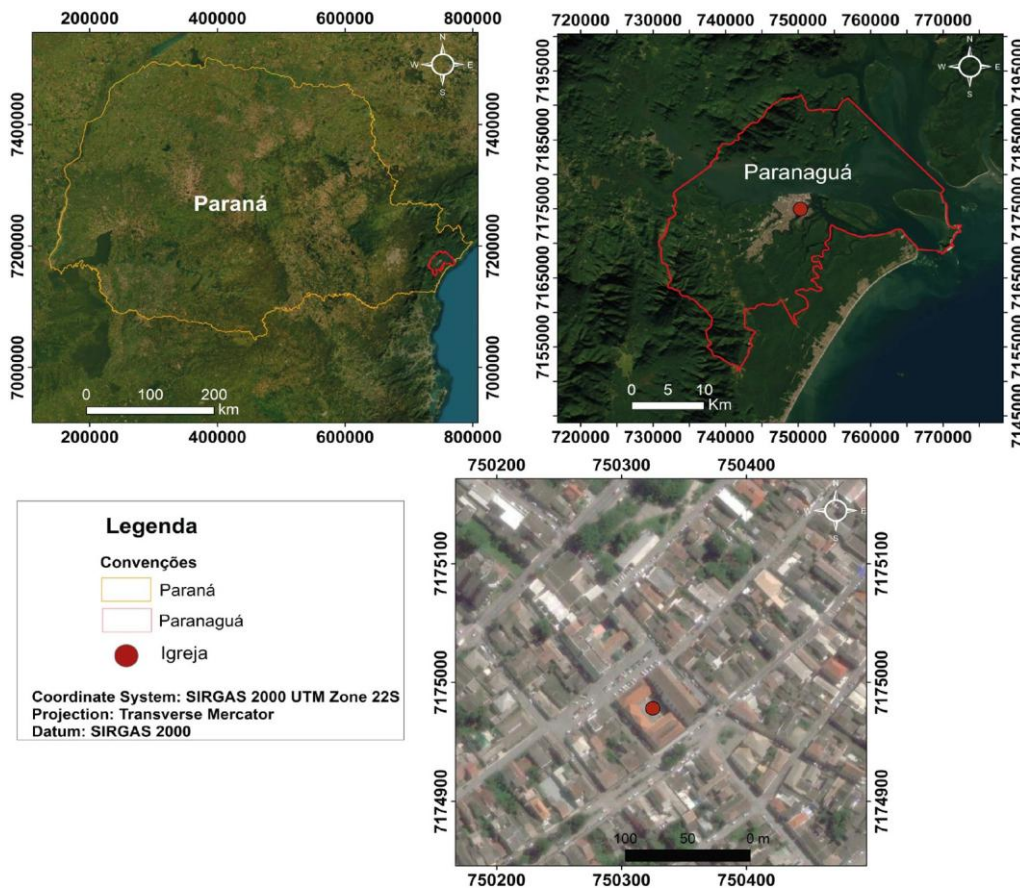


Figura 1. Localização da área de estudo.

Ground Penetrating Radar (GPR):

O Ground Penetrating Radar (GPR) ou Radar de Penetração no Solo é um método geofísico não invasivo com alta resolução e usado em investigações rasas (<50 m) que utiliza ondas de rádio de alta frequência (10 MHz- 2.6 GHz) e está fundamentado no princípio físico da propagação de ondas eletromagnéticas (Annan and Davis 1992; Jol, 2009). Dentre as diferentes técnicas de aquisição, o perfil de reflexão constante ou *constant offset*, é frequentemente aplicado nas investigações de GPR. Nesta técnica, as ante-

nas, transmissora e receptora, estão espaçadas a uma mesma distância e são movimentadas no mesmo sentido na superfície investigada. A antena transmissora irradia constantemente pulsos curtos de onda eletromagnética para a subsuperfície e quando essas ondas se deparam com interfaces entre materiais com contraste de propriedades dielétricas— como permissividade dielétrica e a condutividade elétrica, parte da energia eletromagnética incidente sofre fenômenos como a reflexão, refração e difração. O sinal refletido é captado pela antena receptora e, os dados são registrados, digitalizados e

armazenados na unidade de controle (Daniels, 2004). O tempo de viagem da onda transmitida, refletida e captada é denominado de tempo duplo de trânsito da onda (TWT) medido em nanossegundos (10⁻⁹), **Figura 2**.

As imagens obtidas por meio do GPR, no modo *constant offset*, são representadas em seções bidimensionais denominadas radargramas, onde o eixo horizontal (X) corresponde à distância ao longo do perfil e o eixo vertical (Y) representa o tempo de percurso da onda de ida e volta (TWT), medido em nanossegundos (ns). Os radargramas são compostos pela junção de múltiplos traços individuais, registrados em pontos sucessivos do deslocamento da antena.

Os traços refletem a variação da amplitude dos pulsos eletromagnéticos em função do tempo. O primeiro evento registrado em uma antena não blindada está associado a onda denominada onda aérea, que se propaga diretamente da antena transmissora para receptora através do ar. Em contrapartida, nas antenas blindadas através desta configuração ocorre a atenuação ou supressão da onda aérea, já que a radiação é voltada para a subsuperfície. Assim, o primeiro pulso no radargrama corresponde a onda direta no solo, e este evento é caracterizado por uma alta amplitude e baixa atenuação inicial seguido por reflexões associadas a interfaces no interior do meio investigado.

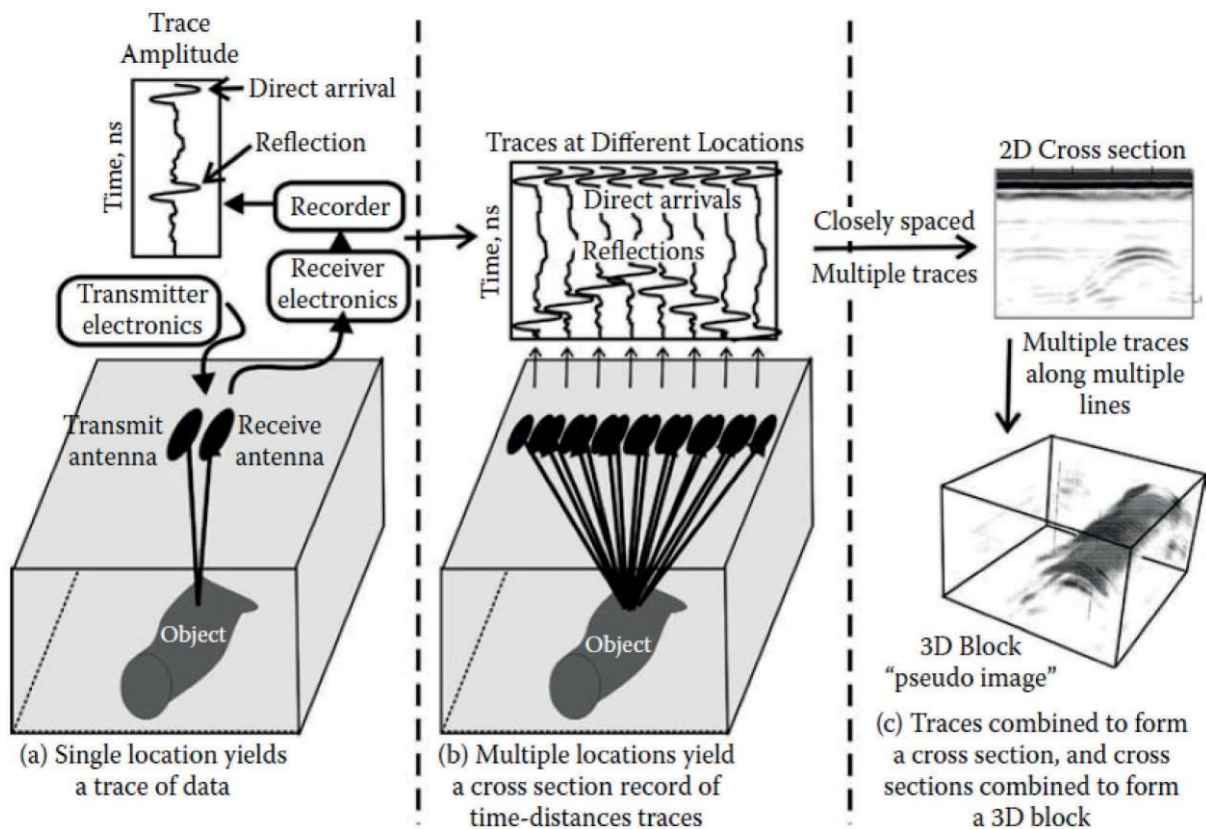


Figura 2. Etapa de processo do GPR:(a) formação de um único traço da onda aérea (amplitude x tempo), mostrando a chegada da onda direta e reflexão do objeto; e (b) múltiplos traços exibidos em diferentes posições (tempo e distância) ao longo da seção. (c) Múltiplos traços com variação na amplitude (escala de cor cinza) resultam em uma seção de radargrama e diferentes seções igualmente espaçadas quando interpoladas possibilitam uma visualização tridimensional. (Allred *et al.*, 2008).

2. PROCEDIMENTO DE CAMPO:

Para obtenção dos dados geofísicos utilizou-se o equipamento GPR SIR3000 (*Geophysical Survey Systems – GSSI*) acoplado com antenas de 400 MHz e 900 MHz. Em todas as áreas investigadas as aquisições das seções 2D ocorreram no modo *constant offset* e os traços foram registrados continuamente com o auxílio de uma roda odométrica. A aquisição de múltiplas seções 2D na mesma área foi necessária para construção de um modelo tridimensional (3D) do local investigado, que permitisse a identificação geométrica e espacial dos alvos. Para isso, as seções foram adquiridas paralelamente e equidistantes

(0,20m), permitindo assim, no processamento, realizar uma interpolação dos dados e gerar o modelo tridimensional (3D).

A Figura 3 apresenta a planta da Catedral Diocesana de Paranaguá com os diferentes locais onde foram realizadas as aquisições de GPR. A área do pátio foi subdividida em setores menores para facilitar tanto a coleta de dados quanto o processamento dos volumes quase3D. A Figura 4 mostra registros fotográficos da etapa de campo, ilustrando a aquisição dos perfis nessas áreas.

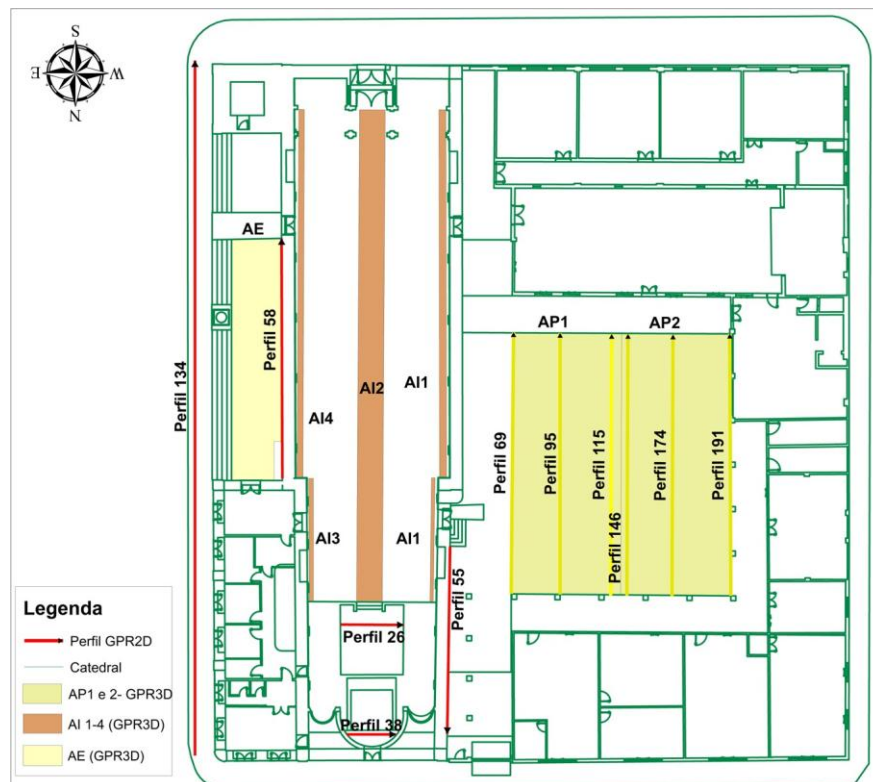


Figura 3. Planta com as áreas investigadas para os perfis 2D individuais e o modelo 3D. Área pátio (AP), área interna (AI) e área externa (AE).



Figura 4. Fotos da aquisição em diferentes locais na Catedral Diocesana de Paranaguá.

A **Tabela 1** reúne os principais parâmetros utilizados na aquisição em campo das seções 2D e indica, para área do pátio, quantos perfis foram levantados para compor o volume pseudo-3D.

	Catedral						
	Interior				Pátio		Externa-escadaria
Parâmetros de campo	AI 1	AI 2	AI 3	AI 4	AP 1	AP 2	AE 1
Frequência da antena (MHz)	400	400-900	400	400-900	400	400	400
Número de amostras	1024	1024	1024	1024	1024	1024	1024
Janela temporal (ns)	150	150-50	150	150-50	150	150	100
Intervalo de amostragem entre os traços (ns)	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Intervalo de amostragem temporal (ns)	0,14	0,14-0,04	0,14	0,14-0,04	0,14	0,14	0,09
Espaçamento entre os perfis (m)	0,18	0,18-0,10	0,18	0,18-0,10	0,20	0,20	0,20
Total de perfis	5	9-17	4	5-8	47	46	18

Tabela 1. Parâmetros usados no SIR 3000 durante a aquisição, espaçamento aplicado para realizar o modelo 3D e totais de perfis em cada área.

3. PROCESSAMENTO DOS DADOS:

Os dados foram processados no software ReflexW, versão 8.2.2 (SANDMEIER, 2009). A rotina de processamento varia de acordo com cada área de estudo, entretanto existem procedimentos que são básicos e que devem ser aplicados nos dados (Annan 2001; Daniels, 2004; Jol, 2009). A **Figura 5** ilustra a rotina de

processamento realizada para obtenção dos produtos finais, a qual consistiu em: conversão de formato do arquivo, ajuste do tempo zero, *time cut*, remoção de ganho, remoção de *background*, ganho (decaimento de energia), filtro passa-banda, filtro fk, migração em tempo (*3Dffi migration – Stolt*).

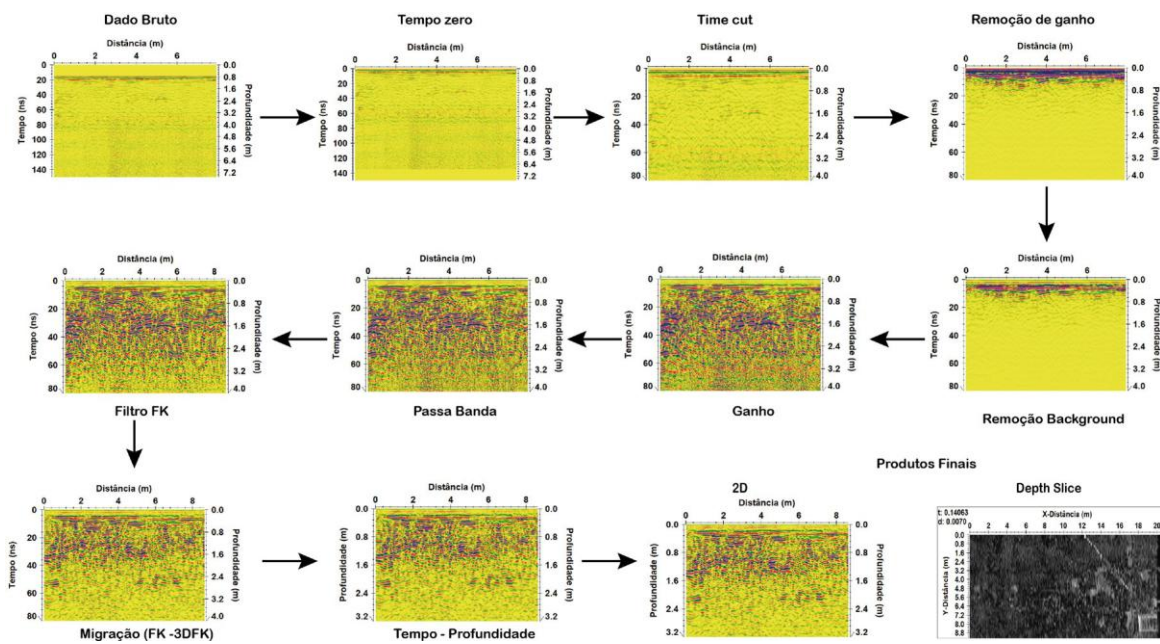


Figura 5: Etapas de processamento aplicadas aos dados geofísicos de GPR.

Para estimar a velocidade (v) de propagação da onda eletromagnética no meio investigado, optou-se por utilizar o modo ajuste hiperbólico da difração que é analisado no software ReflexW. Dessa maneira, a (v) foi aferida em aproximada-

mente de 0,08 m/ns a 0,13 m/ns, a depender do meio investigado. A partir desse parâmetro pode-se estimar a profundidade dos alvos, utilizar para realizar a migração e a conversão tempo em profundidade (**Figura 6**).

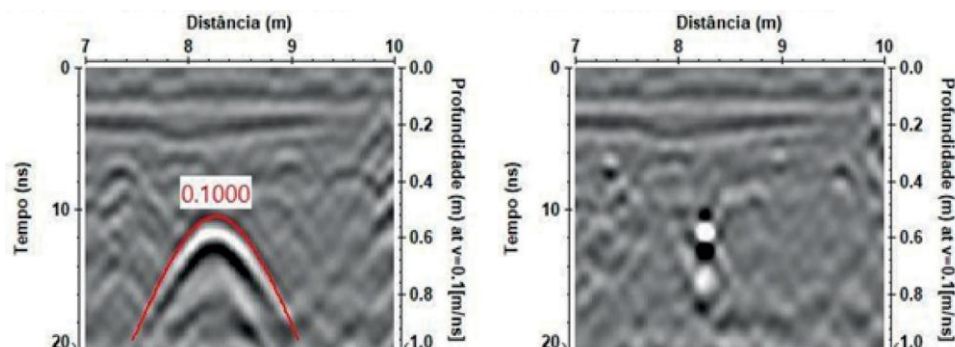


Figura 6: No perfil 134 foi extraída a velocidade do meio pelo modo ajuste hiperbólico (esquerda) e o colapso da hipérbole após aplicar a migração *3Dffi migration – Stolt* (direta).

Através da realização de diversos perfis paralelos, com espaçamento contínuo de XX metros, foram criados os modelos denominados pseudo 3D. Para analisar melhor os diferentes tipos de refletores nos modelos pseudo 3D, foram gerados mapas de amplitude a partir da interpolação dos perfis 2D, os chamados *depth slices*. Esses mapas mostram como a intensidade do sinal varia lateralmente e em profundidade, e possibilitam destacar zonas onde a reflexão tem maior ou menor amplitude. Essa variação de amplitude costuma indicar mudanças no tipo de solo ou rocha e também a presença de materiais enterrados com propriedades diferentes do meio ao redor.

No ReflexW foi utilizado o modo de visualização em que o *depth slice* é exibido junto com os perfis 2D (opção “*show timeslice in add*”). Dessa forma é possível, ver a zona anômala no mapa e, ao mesmo tempo, visualizar como ela aparece nos radargramas. Esse procedimento foi aplicado em todas as áreas investigadas na Catedral Diocesana de Paranaguá e possibilitou auxiliar

na distinção de anomalias relacionadas a alvos pontuais de possíveis camadas estratigráficas.

Resultados

A coleta de dados foi realizada em diferentes ambientes estruturais da Catedral e do seu entorno, incluindo paredes internas e externas, região do altar e a calçada perimetral. Entre todos os perfis adquiridos, foram selecionados aqueles que melhor representam os principais padrões de resposta do método nesses contextos (paredes, pisos, altar e áreas externas), os quais são apresentados nas seções a seguir como exemplos dos resultados obtidos. A classificação dos tipos de refletores adotada para interpretar esses dados segue a abordagem proposta por Neal (2004), que discrimina os eventos de reflexão de acordo com sua geometria e continuidade no radargrama. A seguir, são apresentados os resultados obtidos para os levantamentos em GPR2D e GPR3D, que serviram de base para a síntese dos tipos de refletores organizados na

Tabela 2.

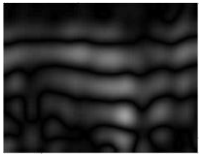
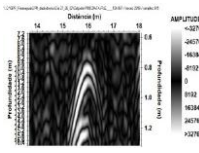
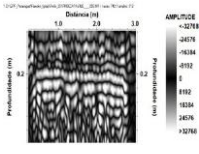
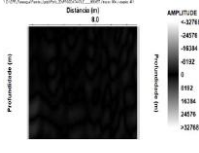
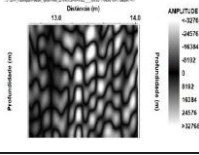
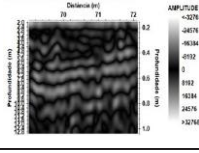
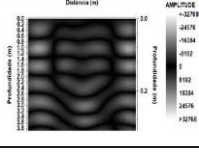
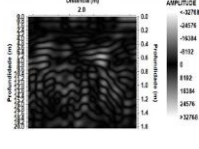
Imagens dos principais refletores	Descrição dos refletores
	<p>Refletores planares/subhorizontais contínuos, baixa a média amplitude de sinal, foram caracterizados próximos a superfície.</p>
	<p>Refletores associados a hiperboles de difração, resposta de alvos pontuais. Variando quanto ao tamanho, abertura e amplitude de sinal.</p>
	<p>Refletores quase planares contínuos paralelos que passam a ser curvilíneo lateralmente (flexura), com uma alta amplitude de sinal.</p>
	<p>Refletores apresentam atenuação de sinal.</p>
	<p>Refletores heterogêneos, difusos e com média a alta amplitude de sinal.</p>
	<p>Refletores subhorizontais levemente inclinados. Com média amplitude de sinal.</p>
	<p>Refletores horizontais e paralelos, de baixa a média amplitude, formando bandas suaves e contínuas ao longo do perfil, com leve ondulação vertical.</p>
	<p>Sob os refletores horizontais de média amplitude, ocorre um conjunto de refletores heterogêneos, também de média amplitude, com traços subparalelos ondulados e segmentos inclinados nas extremidades que cortam e deformam as reflexões horizontais superiores.</p>

Tabela 2. Principais tipos de refletores identificados nos perfis de GPR da Catedral Diocesana de Paranaguá, com exemplos de imagens e descrição resumida, utilizados como referência na interpretação dos dados 2D e quase3D (Adaptado de Neal, 2004).

GPR 2D: Paredes externas oeste e leste (AE)

Nas paredes externas da Catedral, os perfis foram adquiridos para avaliar a possibilidade de distinguir os materiais construtivos ao longo do tempo. No perfil 55 (**Figura 7**), a parede apresenta espessura aproximada de 0,80 m a 1 m. A porção mais superficial do perfil, com cerca de 0,20 m de espessura, mostra refletores lineares e subparalelos bem definidos no topo e na base da camada. Esse conjunto indica uma interface plana e contínua que delimita uma unidade superficial, embora sem relação clara com um elemento construtivo específico da parede (A).

Entre aproximadamente 0,20 m e 0,80 m de profundidade, predominam refletores descontínuos, heterogêneos e muitas vezes hiperbóli-

cos, com amplitudes de baixa a média. Esse padrão indica forte heterogeneidade interna, com várias difrações pontuais e dispersão de energia, compatível com uma alvenaria formada por fragmentos rochosos, seixos, argamassa de diferente composição e conchas, como observado na prospecção da Catedral (B).

Entre a distância 0–3 m, destacase uma anomalia lateralmente restrita, formada por refletores contínuos e de alta amplitude. Eles começam planos, curvamse levemente para os lados e apresentam pequeno aumento de espessura aparente, seccionando ou mascarando parte dos refletores abaixo. Essa resposta é compatível com o confessionário, interpretado como um elemento construtivo maciço ou estruturalmente distinto inserido na espessura da parede (C).

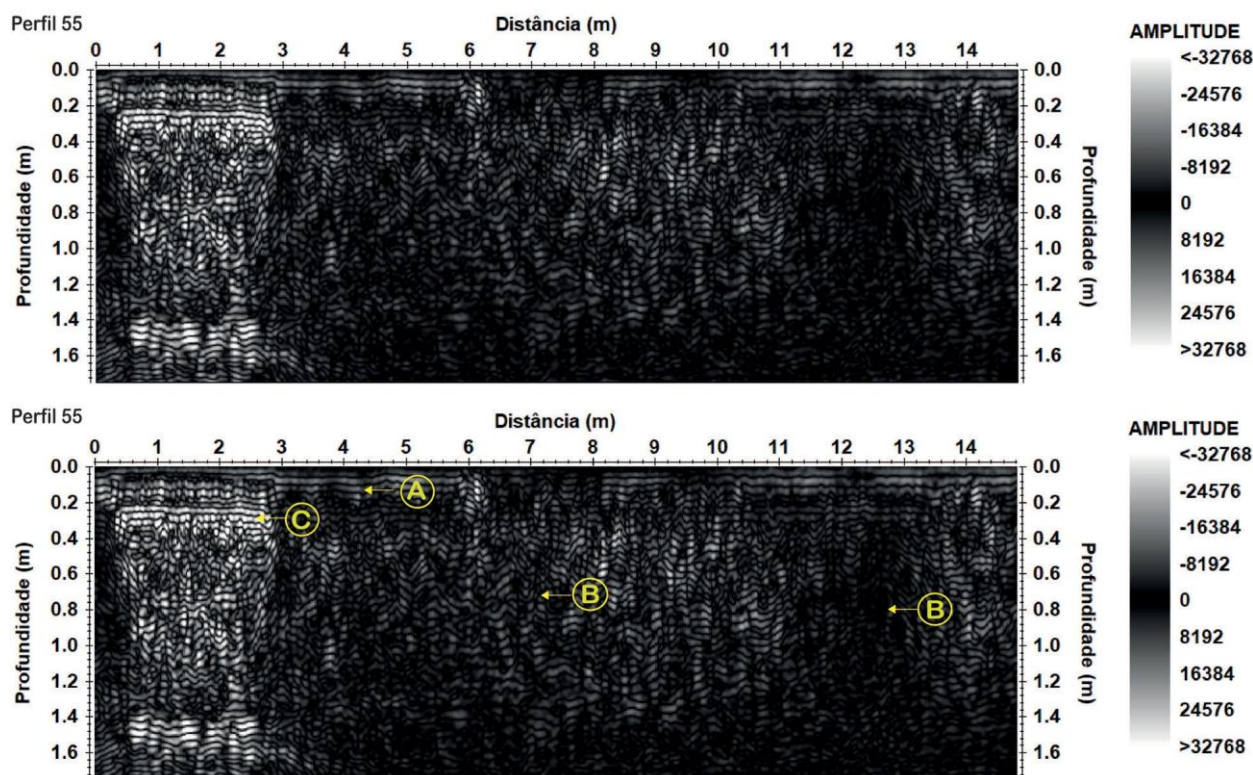


Figura 7: Perfil 55 adquirido na parede externa oeste da Catedral Diocesana de Paranaguá, utilizando antena de 900 MHz. (A) unidade superficial, (B) alvenaria, (C) confessionário.

Na parede externa leste, o perfil 58 (**Figura 8**) mostra unidade superficial do perfil (0–0,18 m), com refletores subparalelos relativamente contínuos, apresentando pequenas variações laterais de continuidade, mas mantendo geometria predominantemente linear (A). Abaixo destes refletores entre a posição 0–8,9 m predominam reflexões heterogêneas, de baixa amplitude e com alta atenuação, e por vezes há presença de refletores lineares (B) associados a alvenaria.

Entre a posição 8,9 m até cerca de 16 m, a assinatura do sinal muda de forma clara: as amplitudes aumentam e a densidade de eventos difratados fica maior. Nesse segmento prevalecem refletores heterogêneos, descontínuos e hiperbólicos, com amplitudes de média a alta, sugerindo forte dispersão interna. Esse comportamento é compatível com uma estrutura construtiva heterogênea, possivelmente associada à presença de fragmentos rochosos (C).

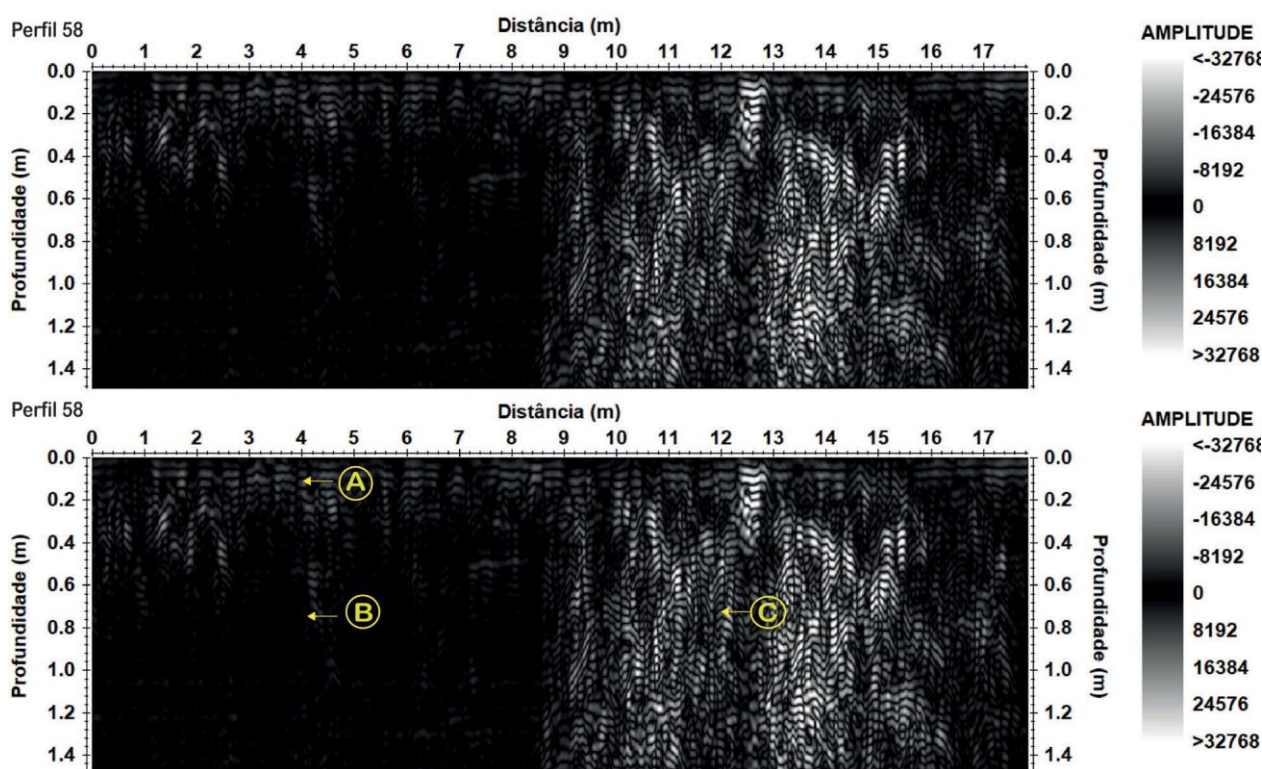


Figura 8: Perfil 58 adquirido na parede externa leste da Catedral Diocesana de Paranaguá, utilizando antena de 900 MHz. (A) unidade superficial, (B) alvenaria, (C) fragmentos rochosos.

Calçada perimetral da Catedral (AE)

Na calçada do entorno da Catedral, o perfil 134 (**Figura 9**) evidencia três unidades principais. A interface superficial, em torno de 0,18 m de profundidade, é marcada por refletores planos e paralelos de baixa amplitude, que correspondem à calçada de *petit pavê* e sua base (A). Abaixo dessa superfície ocorre uma camada dominada por refletores descontínuos e heterogêneos,

com amplitudes que variam de baixas a altas e com zonas de forte atenuação, indicando um meio subsuperficial bastante irregular, provavelmente formado por solos arenosos e argilosos misturados (B). Além disso, são identificados refletores hiperbólicos de diferentes dimensões, que representam alvos pontuais em subsuperfície compatíveis como tubulações, cabos, blocos rochosos ou pequenos objetos enterrados (C).

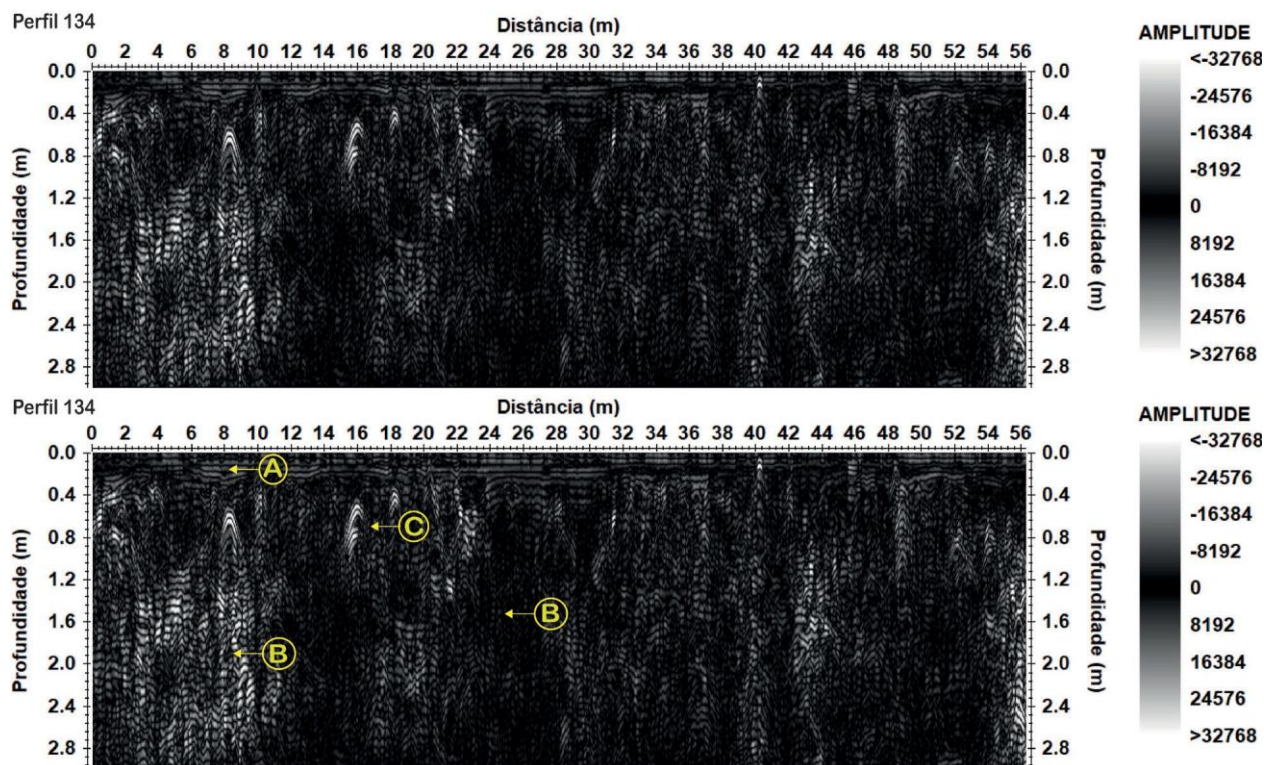


Figura 9: Perfil 134 adquirido na calçada perimetral leste da Catedral Diocesana de Paranaguá, utilizando antena de 400 MHz (não migrado). (A) calçada de *petit pavé* e sua base, (B) solo, (C) tubulações, cabos, blocos rochosos ou pequenos objetos enterrados.

GPR no altar e área adjacente (A1)

As **Figuras 10 e 11** ilustram os perfis 26 e 38, adquiridos sobre o altar e na área imediatamente atrás dele, respectivamente, com o objetivo de investigar a possibilidade de antigos sepultamentos nesse setor da Catedral.

No Perfil 26, a unidade superficial, até aproximadamente 0,0–0,20 m de profundidade, é caracterizada por refletores subparalelos relativamente contínuos, com boa continuidade lateral e de baixa a média amplitude, marcando a interface entre a superfície pavimentada e o material subjacente, compatível com o revestimento de madeira do altar (A).

Imediatamente abaixo dessa interface, observa-se um domínio predominantemente heterogêneo, marcado por refletores descontínuos,

ondulados e lateralmente irregulares, com amplitudes variando de baixa a média (B). A textura do sinal é caracterizada por forte dispersão e padrão granular, sugerindo um meio composto por material solto ou mal selecionado.

No perfil 38 destacam-se dois conjuntos: o nível superficial é composto por refletores retilíneos e descontínuos, também de média amplitude, associados ao piso de cerâmica situado atrás do altar (A); o segundo conjunto, localizado em torno de 0,40 m de profundidade, entre 1,45–2,47 m, corresponde a uma anomalia hiperbólica e heterogênea, de média amplitude, que corta os refletores lineares vizinhos (B). Esse padrão de difração pontual é compatível com uma pequena escavação preenchida e com a presença de um objeto ou estrutura enterrada, em concordância com a hipótese de sepultamento nesse local.

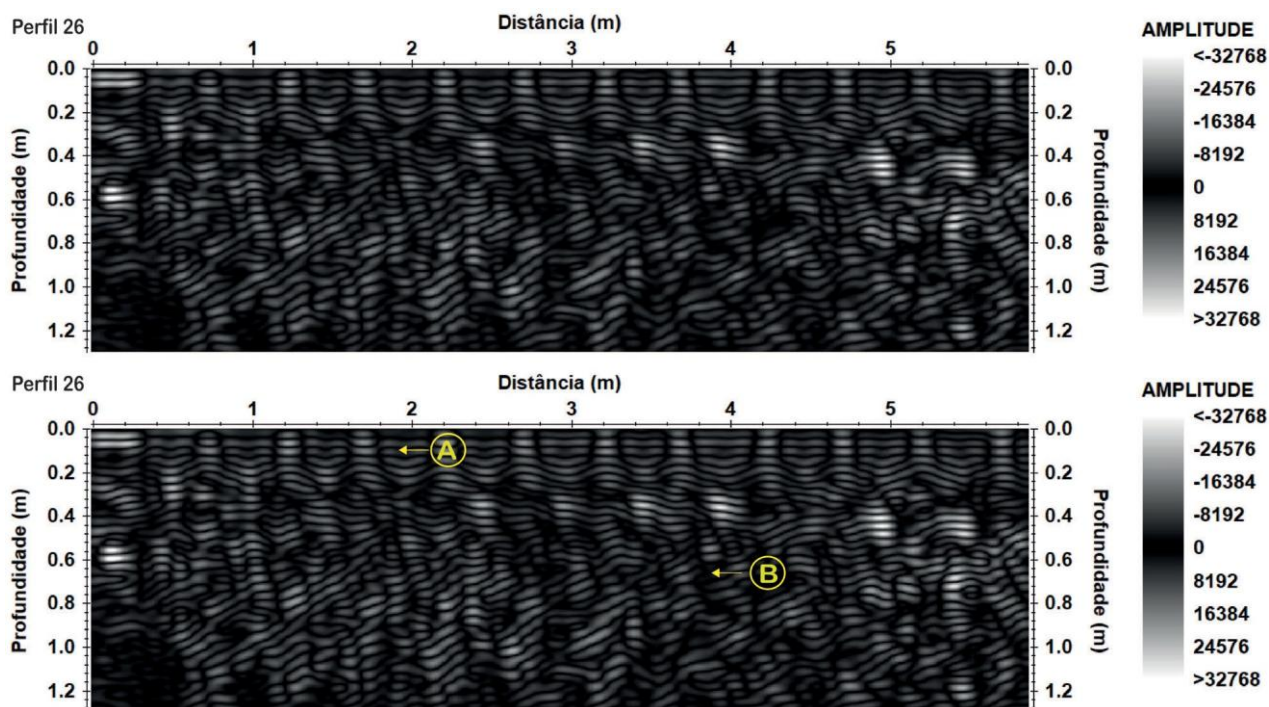


Figura 10: Perfil 26 adquirido no altar e na área adjacente com antena de 900 MHz (não migrado). (A) revestimento de madeira do altar, (B) material solto ou mal selecionado.

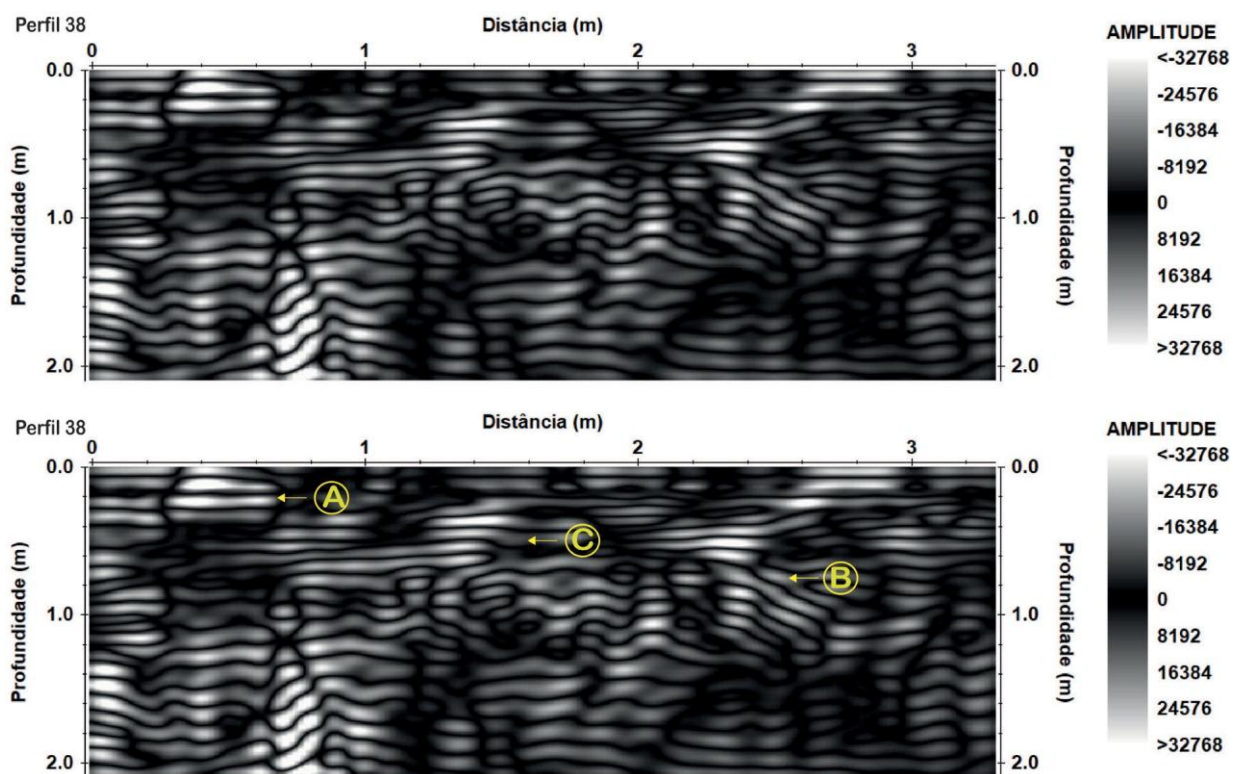


Figura 11: Perfil 38 adquirido no altar e na área adjacente com antena de 900 MHz (não migrado). (A) piso de cerâmica situado atrás do altar (B e C) estruturas enterradas.

Depth slice 3D (fatiamento) adquiridos no pátio da Catedral (AP)

A **Figura 12 (A e B)** ilustra a etapa de pré-análise realizada nas áreas AP1 (A-B), a qual serviu de base para a interpretação final das anomalias de amplitude identificadas no levantamento.

Na **Figura 12 A** *depth slice* pseudo 3D em 0,47 m a anomalia destacada pelo círculo de amplitude está associada, nas seções 2D, a um refletor sub-

-horizontal que acompanha a camada superficial do solo. A resposta apresenta continuidade lateral e ausência de geometria hiperbólica bem definida, indicando tratar-se de uma variação estratigráfica ou contraste dentro da própria camada superficial, e não de um alvo pontual individualizado.

Em contraste, na **Figura 12B**, a anomalia delimitada no *depth slice* em 30,02 m corresponde a uma hipérbole característica de difração associada a um objeto pontual.

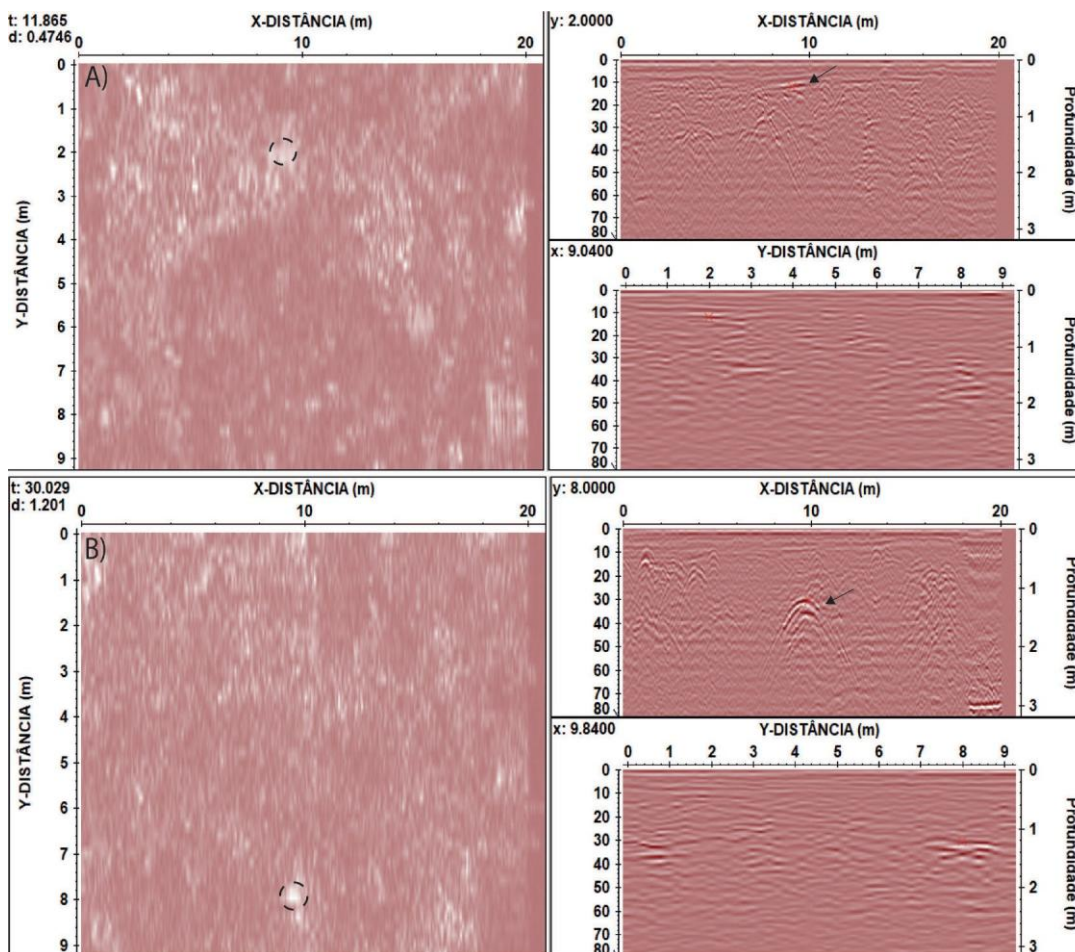


Figura 12. Visualização em *depth slice* pseudo 3D (esquerda A-0,47 m e B-30,02 m) e cortes 2D ortogonais (direita) da área AP1, evidenciando a assinatura da zona anômala identificada no *depth slice* e sua correspondente resposta nos perfis verticais. (A) camada superficial, (B) objeto enterrado.

Pátio na catedral (AP1 e AP2)

Na área AP1 (**Figura 13**), os *depth slices* foram gerados para as profundidades de 0,13 m, 0,54 m, 1,25 m, 1,31 m, 1,93 m e 2,76 m. No nível mais raso (0,13 m), destaca-se uma reflexão linear em diagonal, interpretada como uma tubulação (A). A partir de 0,54 m até 2,76 m (painéis B a E), surgem zonas anômalas de amplitude média a alta, contínuas em profundidade, que indicam a presença de objetos enterrados com propriedades dielétricas diferentes do solo ao redor. Esses alvos podem estar relacionados a artefatos arqueológicos, possíveis sepultamentos e/ou blocos rochosos, em boa concordância

com os padrões de refletores planares e hiperbólicos observados nos perfis 2D.

Na área AP2 (**Figura 14**), os *depth slices* foram calculados para 0,02 m, 0,14 m, 0,65 m, 0,79 m, 0,90 m e 0,93 m. As profundidades mais superficiais (0,02 m e 0,14 m; painéis A e B) registram principalmente o piso de cimento do estacionamento e um provável cano disposto em diagonal no pátio. Já entre 0,65 m e 0,93 m (painéis C a E), aparecem zonas anômalas de amplitude média a alta, contínuas ao longo desses níveis, que apontam para materiais enterrados com forte contraste dielétrico em relação ao sedimento de fundo, reforçando o quadro interpretativo construído a partir das seções bidimensionais.

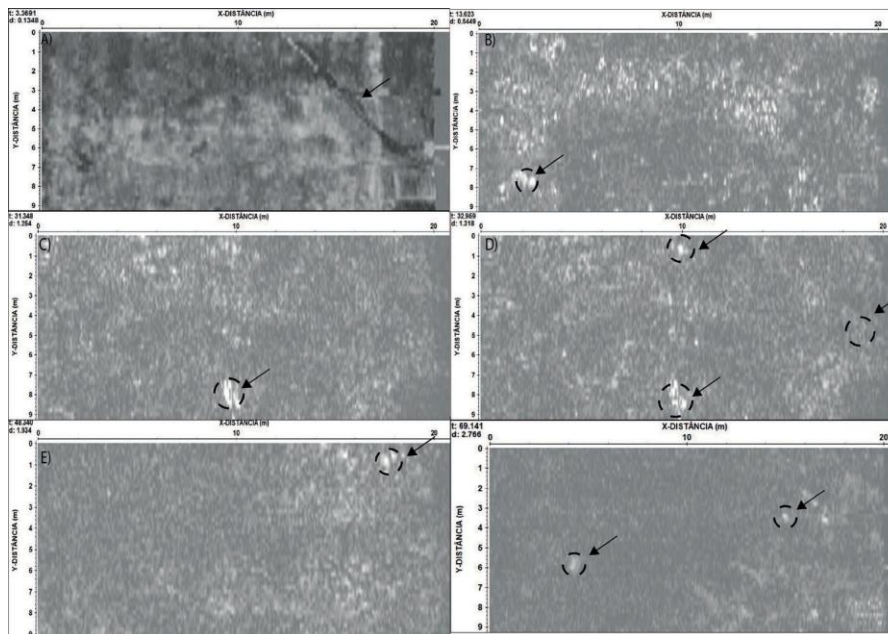


Figura 13: *Depth slice* extraído da área AP1 nas profundidades de 0,13m, 0,54m, 1,25m, 1,31m, 1,93m e 2,76m. (A) tubulação (B a E) objetos enterrados e/ou artefatos.

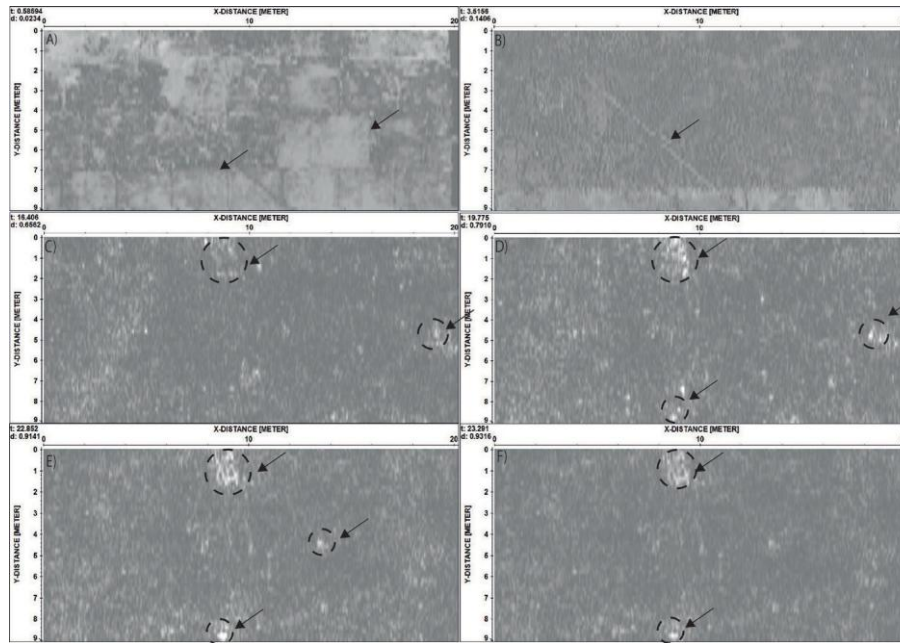


Figura 14: *Depth slice* extraído da área AP 2 nas profundidades de 0,02m, 0,14m, 0,65 m, 0,79 m, 0,90m e 0,93m. (A e B) piso de cimento e provável cano disposto em diagonal no pátio, (C e E) objetos enterrados e/ou artefatos.

CONCLUSÃO

O levantamento geofísico com GPR realizado na Catedral Diocesana de Paranaguá, em modos 2D e pseudo3D, permitiu reconhecer a resposta típica das principais estruturas da catedral e do seu entorno. As informações do Projeto Marco Zero indicam que as paredes foram construídas com fragmentos rochosos e seixos ligados por argamassa de barro e conchas, técnica comum no litoral paranaense, e essa heterogeneidade aparece de forma clara nos perfis, na alternância entre trechos de forte atenuação do sinal e zonas de maior contraste dielétrico.

O método também permitiu mapear elementos internos importantes. O confessionário se destaca como um local bem definido dentro da parede, com refletores contínuos e amplitudes superiores as paredes de alvenaria. Na área do altar, o perfil 38 mostra uma anomalia em torno de 0,40 m de profundidade e cerca de 1 m de extensão, com geometria compatível com uma pequena escavação preenchida; essa feição está de acordo com a hipótese, apontada em fontes históricas, de sepultamentos nesse setor, ainda que o GPR, sozinho, não permita confirmar a natureza arqueológica desse alvo.

As anomalias observadas nos dados, seja na forma de hipérbolas nos perfis 2D, seja como manchas de alta amplitude nos *depth slices* (fatiaamentos), refletem principalmente contrastes de permissividade dielétrica e de condutividade entre materiais distintos, como solo, rocha, alvenaria mista, madeira, metal ou vazios. Uma mesma assinatura pode indicar desde cavidades e blocos rochosos até mudanças de técnica construtiva ou sepultamentos, o que torna essencial a integração com informações históricas e arquitetônicas e, quando possível, com verificações diretas.

Os padrões de reflexão identificados neste trabalho, envolvendo pisos, interfaces construtivas, alvenaria mista e zonas anômalas nas áreas do altar e do pátio, constituem um conjunto de referência útil para estudos futuros em outras igrejas históricas da região.

Por fim, para melhor detalhamento da estrutura interna das paredes, recomendase empregar antenas de frequências mais altas, em torno de 1,5 a 2,5 GHz, em malhas pseudo 3D de alta resolução, de modo a separar com maior segurança os diferentes agregados e reduzir ambiguidades na interpretação.

AGRADECIMENTOS

Ao LPGA- UFPR (Laboratório de Pesquisas em Geofísica Aplicada) e sua equipe pelo apoio logístico e técnico. A Esteio Engenharia e Aerolevantamentos S.A. pelo empréstimo das antenas. Ao projeto cultural Marco Zero: Projetos Arquitetônicos e de Restauro da Igreja Matriz de Nossa Senhora do Rosário – Paranaguá-PR, financiada pela Lei Federal de Incentivo à Cultura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLEN, J.S.; PORSANI, L.J.; POLUHA, B. Geofísica arqueológica no ambiente da arqueologia urbana: proposta metodológica para projetos públicos. *Revista de Arqueologia*, 30 (1), 235-254, 2017. <https://doi.org/10.24885/sab.v30i1.510>
- ALLRED, B.J.; DANIELS, J.J.; ESHASI, M.R. *Handbook of Agricultural Geophysics*. Taylor & Francis Group, LLC, 2008. 432 p. Disponível em: <https://doi.org/10.1201/9781420019353>
- ANNAN, A.P.; DAVIS, J.L. 1992. Design and development of a digital ground penetrating radar system. In J. Pilon (ed.), *Ground Penetrating Radar* (Geological Survey of Canada, Paper 904, pp. 23–29).
- ANNAN, A. P. Ground penetrating radar workshop notes. Mississauga: Sensors & Software Inc., 2001. 197 p.
- BARRACA, N.; MATIAS, M.; ALMEIDA, F.; MOSTEIRO, P. O método de radar de penetração no solo (GPR) na caracterização do Mosteiro da Batalha. *Conservar Patrimônio*, n. 32, p. 6578, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.14568/cp2018050>.
- CONYERS, L. B.; LUCIUS, J. E. Velocity analysis in archaeological groundpenetrating radar studies. *Archaeological Prospection*, v. 3, p. 2538, 1996.
- CONYERS, L. B.; GOLDMAN, D. *Groundpenetrating radar: an introduction for archaeologists*. Walnut Creek: Altamira Press, 1997. 232 p.
- CONYERS, L. B. *Ground penetrating radar for archaeology*. Walnut Creek: Altamira Press, 2004. 224 p.
- CONYERS, L. B. Innovative groundpenetrating radar methods for archaeological mapping. *Archaeological Prospection*, v. 13, p. 139141, 2006.
- CONYERS, L. B.; LECKBUSCH, J. Geophysical archaeology research agendas for the future: some ground penetrating radar examples. *Archaeological Prospection*, p. 117123, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/arp.379>.
- CONYERS, L. B. *Interpreting groundpenetrating radar for archaeology*. Abingdon: Routledge, 2012. 221 p.
- DANIELS, D. J. *Ground penetrating radar*. London: The Institution of Electrical Engineers, 2004.
- DE GIORGI, L.; FERRARI, L.; GIURI, F.; LEUCCI, G.; SCARDOZZI, G. Integrated geoscientific surveys at the Church of Santa Maria della Lizza (AleziolItaly). *Sensors*, v. 21, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/s21062205>.
- JOL, H. M. *Ground penetrating radar: theory and applications*. Amsterdam: Elsevier, 2009.
- NEAL, A. Groundpenetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress. *Earth-Science Reviews*, v. 66, n. 34, p. 261330, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2004.01.004>.
- SANDMEIER, K. J. ReflexW. Version 8.0: manual. Karlsruhe, 2009.
- ZHAO, W.; FORTE, E.; PIPAN, M.; TIAN, G. Ground penetrating radar (GPR) attribute analysis for archaeological prospection. *Journal of Applied Geophysics*, v. 97, p. 107117, 2013. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926985113000906>.