

Avaliação da constituição de elementos estruturais através do Radar de Prospeção Geotécnica

Francisco Fernandes¹, Paulo B. Lourenço², Luigi Zanzi³

¹*Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Portugal, Tel.: +351 253510200,
Fax: +351 253510217, Investigador, fmcpf@civil.uminho.pt*

²*Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Portugal, Tel.: +351 253510200,
Fax: +351 253510217, Professor associado, pbl@civil.uminho.pt*

³*Dipartimento di Ingegneria Strutturale (DIS), Politecnico di Milano, Italia, Tel.: +39 223994202,
Fax: +39 223994300, Professor associado, zanzi@stru.polimi.it*

Introdução

A constituição das estruturas históricas é um tema de elevada importância e que, nos últimos anos tem sido objecto de ampla investigação. O conhecimento rigoroso dos materiais, da geometria e das técnicas de construção empregues na construção do património histórico é fundamental, para que se possa compreender melhor o seu comportamento estrutural. A detecção de possíveis deficiências e anomalias é, igualmente essencial, para se proceder a um diagnóstico do estado de conservação da estrutura. No entanto, a obtenção dessa informação é difícil sem que sejam obtidas amostras e que sejam abertas janelas de inspecção, que levam a uma perda localizada de material e a possíveis danos. Assim, técnicas não destrutivas são cada vez mais utilizadas para obter informação sobre a geometria, a natureza dos materiais e possíveis anomalias.

Uma técnica não destrutiva que tem sido recentemente utilizada para inspecionar estruturas existentes de alvenaria, revelando elevado potencial, é o Radar de Prospecção Geotécnica, georadar, ou GPR (*“Ground Penetrating Radar”*) no original anglo-saxónico. Trata-se dum sistema de inspecção baseado na emissão de ondas electromagnéticas de elevada frequência, com elevada capacidade para detectar interfaces entre materiais com propriedades dieléctricas distintas (Fernandes, 2006). O georadar deriva de tecnologia militar (Buder, 1998) e tem vindo a ser utilizado, nos últimos 30 anos, na prospecção geológica, onde possuiu um vastíssimo leque de aplicações (Reynolds, 2002). Apesar disso, as aplicações em engenharia de estruturas são relativamente recentes.

Neste artigo, é apresentado como caso de estudo a investigação realizada na Igreja do Mosteiro dos Jerónimos, para avaliação da geometria e constituição interna de elementos estruturais. O Mosteiro dos Jerónimos é um dos monumentos mais

emblemáticos de Portugal, tendo sido considerado Monumento Nacional em 1907 e Património Cultural da Humanidade pela UNESCO em 1984 (ver Figura 1).

Numerosos estudos científicos tem sido realizados com o objectivo de avaliar os materiais, compreender melhor a estrutura complexa do monumento e verificar a sua capacidade de resistência aos sismos, nomeadamente através de modelos numéricos de elementos finitos (Lourenço et al., 2007). Esses estudos demonstraram que as colunas da nave que suportam a abóbada principal da Igreja do Mosteiro (Figura 2), apresentam um estado de tensão elevado e são muito relevantes num eventual colapso da estrutura. Assim, a avaliação da constituição dessas colunas e a aferição de valores realistas das suas características mecânicas é importante.

Neste artigo, a inspecção com o georadar equipado com uma antena de 1 GHz teve como objectivo definir a constituição das colunas da nave e verificar a sua integridade estrutural, detectando por exemplo características construtivas invisíveis ou deficiências causadas por efeitos de longo prazo. Um dos objectivos mais relevantes seria verificar se os segmentos das colunas são constituídos por pedras únicas e se possuem elementos internos de ligação (gatos metálicos, por exemplo) (ver Figura 3). As colunas investigadas medem mais de 20 m de altura, possuem um diâmetro médio exterior de 100 cm e são constituídas por segmentos individuais com cerca de 50 cm de altura. Na base, o diâmetro aumenta para cerca de 120 cm. O material de construção é, essencialmente, pedra de Lioz, que é um calcário fossilífero branco.

Descrição do GPR e modo de funcionamento básico

O Radar de Prospecção Geotécnica é uma técnica de inspecção não destrutiva, baseada na emissão de radiação electromagnética, com a finalidade de detectar objectos e camadas de materiais distintos, através do contraste entre as propriedades

dieléctricas desses materiais. Uma descrição mais detalhada da história deste sistema e do seu funcionamento pode ser encontrada em Daniels (2004).

Um sistema de radar de prospecção geotécnica moderno está ilustrado na Figura 4. É constituído por uma unidade de controlo e gerador de sinal, uma ou mais antenas, com frequências que vão dos 20 aos 2000 MHz, variando conforme forem para aplicações de índole geológica ou para aplicações em engenharia, um sistema de posicionamento (geralmente composto por um odómetro digital), e um computador para configuração dos ensaios, armazenamento dos dados e visualização e processamento dos dados em campo em tempo real.

Este equipamento permite a aquisição de dados em diferentes configurações. Assim, dependendo do objectivo da investigação, pode-se utilizar o GPR em modo de reflexão, que é o método mais frequentemente utilizado, e que permite resolver a maioria das situações correntes, em modo de transmissão directa e através do método Ponto Médio Comum, ou CMP (*“Common Mid-Point”*) no original anglo-saxónico. A aquisição em modo de reflexão, que foi a metodologia utilizada neste trabalho, está ilustrada na Figura 5.

A Figura 5 exhibe, igualmente, o funcionamento básico do georadar, que consiste na emissão de impulsos electromagnéticos de alta voltagem e curta duração, através de uma antena emissora, e na leitura dos ecos produzidos por objectos e características do subsolo ou da estrutura investigada. Geralmente, em cada posição da antena, um número elevado de impulsos são emitidos, e os ecos produzidos são lidos pela antena emissora, que os regista num traço, correspondente à amplitude do sinal em função da profundidade. A progressiva aquisição, ao longo da direcção de investigação, resulta num conjunto ordenado de traços sucessivos, constituindo assim um radargrama. Esta metodologia está ilustrada na Figura 6.

A velocidade de propagação das ondas electromagnéticas e a produção de ecos, que possam ser devolvidos, está estritamente dependente das propriedades dieléctricas dos materiais. Assim, materiais que exibam valores muito distintos da constante dieléctrica, terão mais probabilidades de serem detectados devido a uma maior quantidade de energia reflectida. Um impulso electromagnético propaga-se no ar a uma velocidade próxima da velocidade da luz (30 cm/ns), enquanto que no solo e em materiais de construção comuns (betão armado, alvenaria) propaga-se a uma velocidade inferior compreendida, geralmente, entre 10 e 14 cm/ns. Acrescenta-se que a profundidade de inspecção e a resolução dos resultados estão directamente relacionados com a frequência e o comprimento de onda do sinal irradiado. Portanto, sinais de baixa frequência permitem alcançar profundidades mais elevadas do que sinais de alta frequência, devido à tendência dos materiais em absorver mais rapidamente as ondas com menor comprimento de onda (Forde, 2004). Não obstante, ondas com uma frequência elevada possuem maior precisão devido à sua maior capacidade em distinguir objectos de pequena dimensão e camadas muito próximas, geralmente na ordem da metade do comprimento de onda. Assim sendo, a escolha da antena resultará sempre do compromisso entre a profundidade de inspecção a ser alcançada e a precisão necessária, tendo em vista o mapeamento dos objectos e as características da zona investigada.

Metodologia de aquisição

A inspecção com georadar realizada na Igreja dos Jerónimos foi efectuada em modo de reflexão ao longo de cerca de um terço do desenvolvimento (7 metros) das quatro colunas seleccionadas, tendo em vista a restrição de altura da plataforma elevatória disponível. A superfície das colunas é trabalhada e muito irregular, o que impossibilitou a execução do ensaio directamente aplicado sobre a superfície. Para proteger o

trabalho da pedra, foi utilizada uma placa de neopreno, com cerca de 3 cm de espessura, entre a superfície das colunas e a antena. A metodologia de aquisição está ilustrada na Figura 7. Esta estratégia impediu a obtenção de perfis contínuos de radar, sendo os resultados obtidos por troços com o desenvolvimento da placa de neopreno. Salienta-se ainda que, na parte mais alta da zona de inspecção existe uma zona de pedra lisa, que permitiu a inspecção sem o recurso à placa de neopreno. Em seguida, os resultados da coluna 1 serão analisados detalhadamente. Para as colunas 2, 3 e 4 serão apenas apresentados resultados globais.

Determinação da velocidade média de propagação

A determinação prévia da velocidade de propagação no material a ser investigado é muito relevante para a determinação da localização das irregularidades no interior dos elementos. O cálculo da velocidade média de propagação foi determinado medindo o tempo necessário para que o impulso viaje até à superfície oposta da coluna e volte à antena emissora. Para determinar com precisão a localização da superfície oposta, a medição foi efectuada colocando e retirando uma placa metálica na superfície em questão durante o decorrer da medição, uma vez que o metal reflecte a maior parte da radiação electromagnética. A Figura 8 ilustra a metodologia seguida.

A avaliação da velocidade foi efectuada a partir dos resultados obtidos na secção com superfície lisa, o que permitiu um melhor contacto da antena e da placa metálica com a superfície da coluna, melhorando a precisão dos resultados. Foram efectuados radargramas nas quatro colunas, tendo sido obtidos valores muito próximos. A Figura 9 ilustra o resultado obtido na coluna 1, onde a placa metálica foi detectada a cerca de 18.7 ns da superfície de contacto. Sendo o diâmetro da coluna de 96 cm a esse nível, foi estimada uma velocidade média de propagação de 10.3cm/ns, velocidade que se encontra dentro dos valores típicos para alvenaria de pedra seca, e que foi adoptada

em todo o trabalho para determinação da profundidade das irregularidades detectadas posteriormente.

Análise da coluna 1

A análise à coluna 1 (ver localização na Figura 3) iniciou-se pela análise ao elemento na sua base, que foi estudado sem o auxílio de plataforma elevatória, estando, o resultado obtido pela inspecção com georadar ilustrado na Figura 10. No radargrama apresentado, é possível observar o sinal da superfície oposta a cerca de 21.9 ns, o que resultou num diâmetro total de 113 cm utilizando a velocidade média de propagação calculada anteriormente (8 % inferior ao diâmetro real, que é 121.5 cm). O radargrama foi melhorado posteriormente com um filtro de controlo automático de ganho,(AGC), com uma janela de 10 ns, que permitiu diminuir a diferença relativa das amplitudes entre o sinal correspondente à superfície de contacto, os sinais da superfície oposta e os sinais contidos no interior da coluna, normalmente com amplitudes mais baixas.

Verifica-se, então, que o sinal central atravessa todo o registo, levando a admitir que é uma característica presente em grande parte do elemento na base da coluna. De maneira que, é razoável assumir que se possa estar na presença de uma fenda ou junta entre segmentos de pedra. De maneira a verificar, por inspecção visual, comprovação dos resultados obtidos no interior da base pelo GPR, podem observar-se na Figura 11a,b exemplos de juntas argamassadas entre pedras. A Figura 11c exhibe fendas irregulares na área investigada com o GPR, podendo admitir-se que o radargrama mostra, efectivamente, a existência de uma fenda a cerca de 60 cm da superfície (11.3 ns).

Os restantes elementos da coluna foram inspeccionados começando pelo elemento mais alto e descendo, sucessivamente, até aos elementos mais baixos da coluna. Logo, o elemento mais alto será analisado primeiro. Um dos radargramas resultantes está ilustrado na Figura 12, caracterizado por uma boa penetração, porém com sinais internos de amplitude reduzida. Em todos os radargramas foram sistematicamente detectados hipérbolos no topo dos perfis a 49 cm de profundidade (9-10 ns) e ao nível de uma junta horizontal, a cerca de 62 cm de profundidade (12 ns). Além disso, um sinal de amplitude elevada destaca-se no radargrama a cerca de 33.5 cm de profundidade (6 ns) e com, aproximadamente, 25 cm de altura, que pode ser atribuído a um destacamento localizado. No entanto, este sinal não aparece noutros perfis efectuados à volta do elemento. Para definir mais concretamente a natureza deste forte sinal, tentou verificar-se a localização da junta horizontal para perceber se esse sinal atravessava vários elementos ou estava restrito a um único elemento. De maneira a realçar o sinal que localiza a junta, o traço médio foi eliminado de maneira a fazer realçar as difracções, resultando no radargrama da Figura 13. Assim, a hipérbole situada a 62 cm de profundidade sai realçada e verifica-se que a junta está localizada a cerca de 25 cm da parte de baixo do radargrama, que corresponde à altura do sinal de amplitude elevada identificado na Figura 12.

Os radargramas dos elementos seguintes não revelaram nenhum sinal proveniente de fendas ou juntas, tendo-se verificado que a coluna é relativamente homogénea. A coluna foi representada na integra na Figura 14, onde se pode observar que o material é homogéneo, verificando-se, somente, uma descontinuidade linear entre os elementos C e D. Sinal esse que poderá corresponder a uma junta, sendo então possível que, nesse local, as pedras da coluna sejam constituídas por vários elementos e não por um único elemento.

Análise das colunas 2, 3 e 4

A análise das restantes colunas seguiu a metodologia aplicada no estudo da coluna 1. Assim, o elemento na base da coluna 2 foi estudado em primeiro lugar e o radargrama resultante está ilustrado na Figura 15. Este mostra um sinal de forte amplitude localizado a cerca de 40 cm da superfície de aplicação do georadar (7.7 ns). É de notar que este radargrama foi obtido sem processamento adicional, pois só a escala de saturação foi deslocada de maneira a realçar as amplitudes mais baixas. Neste caso, este sinal pode corresponder a uma junta com espessura significativa, por volta de 1 cm. Ao aplicarem-se filtros adicionais de ganho, dois sinais oblíquos são observados em cima e em baixo do perfil, correspondendo provavelmente a fendas nesses níveis. Relativamente ao mesmo elemento da coluna 3, ilustrado na Figura 16a, verifica-se um sinal vertical ao longo de todo o perfil, apesar da amplitude ser relativamente baixa, que parece sugerir que o segmento ensaiado é constituído por dois elementos de pedra com uma junta de espessura mínima. O radargrama da coluna 4 (Figura 16b) revela dois sinais oblíquos, um no topo do perfil que se estende cerca de 20 cm, e outro, mais curto, em baixo. Assim, o segmento ensaiado com o georadar configura-se como um segmento homogéneo e constituído por um único elemento, no entanto os segmentos situados em cima e em baixo apresentam características, que indiciam serem constituídos por dois ou três elementos.

O estudo das colunas 2, 3 e 4 pode ser observado na Figura 17, onde foram justapostos os radargramas resultantes do estudo da coluna inteira, com a excepção dos elementos da base da coluna. É possível, assim, verificar que poucos eventos foram detectados, sugerindo que as colunas apresentam uma constituição relativamente homogénea e sem anomalias evidentes, com excepção do segmento A”” (ver Figura 14) onde existem algumas juntas e fendas a pouca profundidade. Por outro lado, vários sinais isolados de pequena amplitude podem ser observados em alguns dos segmentos, com particular incidência no segmento “C” (ver Figura 14). Nesse

segmento da coluna 2 e 4, os sinais dentro do interior da secção da coluna exibem uma amplitude próxima de metade da amplitude do sinal correspondente à superfície de contacto e situam-se relativamente próximos da superfície da coluna. Quer isto dizer que, provavelmente, podem tratar-se de fendas por compressão excessiva.

Conclusões

O radar de prospecção geotécnica foi aplicado no estudo de quatro colunas, que suportam a abóbada principal da Igreja do Mosteiro dos Jerónimos com o objectivo de estudar a constituição interna e a detecção de possíveis anomalias. Os resultados permitiram verificar que não existem elementos metálicos de ligação entre as peças que constituem as colunas e que as colunas são caracterizadas essencialmente por material homogéneo, não apresentando grandes sinais de anomalias significativas. As colunas são constituídas essencialmente por elementos únicos, existindo segmentos com dois a três elementos, nomeadamente, na zona das colunas sem ornamentação e no elemento base das colunas. A base, devido à sua dimensão, é constituída por dois ou mais elementos de pedra. A intensidade significativa de alguns dos sinais referentes a estas juntas sugere que algumas destas juntas sejam secas ou que tenham surgido uma separação posterior à construção.

Desta forma, a resistência das colunas à compressão e a sua rigidez serão elevadas e, em princípio, compatíveis com as elevadas tensões instaladas nas colunas e com a elevada esbelteza das colunas. Verifica-se ainda que a pouca profundidade foram encontradas algumas (poucas) fendas ou destacamentos da pedra, que estão provavelmente relacionados com o elevado estado de tensão aplicado e alguma deficiência original no material.

Salienta-se ainda que não foi possível obter uma confirmação visual conclusiva da presença de juntas ou fendas no interior da coluna, a partir da informação na superfície exterior.

Agradecimentos

O primeiro autor agradece o financiamento parcial deste trabalho de investigação pela FCT (Fundação para a Ciência e a Tecnologia) através da bolsa de doutoramento POCTI SFRH/BD/6409/2001.

Referências

Buderi, R. (1998). "The Invention That Changed the World: How a Small Group of Radar Pioneers Won the Second World War and Launched a Technological Revolution." Simon & Schuster, 576p.

Daniels, D.J. (2004). "Ground Penetrating Radar – 2nd Edition." Radar, sonar, navigation and avionics series 15, IEE, London, UK, 726p.

Fernandes F.M. (2006) "Evaluation of two novel NDT techniques: microdrilling of clay bricks and ground penetrating radar in masonry." Tese de Doutoramento, Universidade do Minho. Disponível em: www.civil.uminho.pt/masonry.

Forde, M.C. (2004). "Ground Penetrating Radar." *Proc., Introduction to Non-destructive Evaluation Technologies for Bridges Conference*, Transportation Research Board, 20p.

Lourenço, P.B., Krakowiak, K.J., Fernandes, F.M., Ramos, L.F. (2007). Failure analysis of Monastery of Jerónimos, Lisbon: How to learn from sophisticated numerical models?, *Engineering Failure Analysis* (no prelo) .

Reynolds, J.M. (2002) "An introduction to applied and environmental geophysics", John Wiley & Sons, Chichester.



(a)



(b)

Figura 1 – Mosteiro dos Jerónimos. (a) Vista área e (b) vista do interior da Igreja.



Figura 2 – Aspecto das colunas da Igreja investigadas.

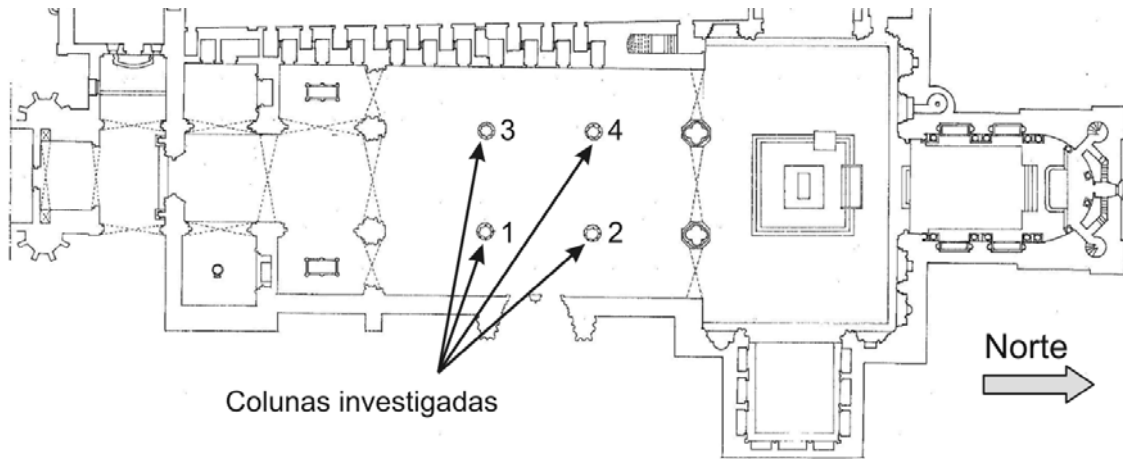


Figura 3 – Vista geral da planta da nave da Igreja e do local dos ensaios com GPR.



Figura 4 – Sistema de Radar de Prospecção Geotécnica do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, incluindo unidade de controlo e gerador de sinal, e duas antenas.

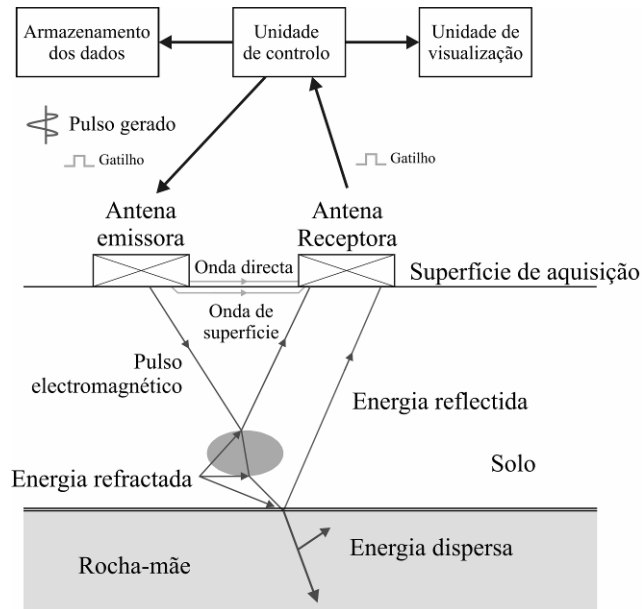


Figura 5 – Elementos constituintes dum sistema moderno de georadar e funcionamento básico.

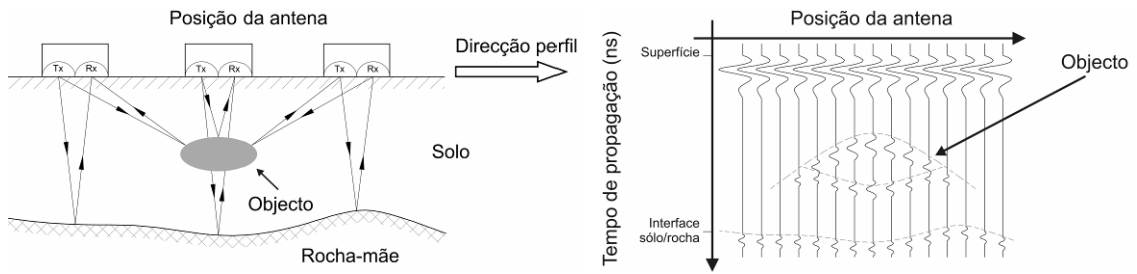


Figura 6 – Produção dum radargrama em modo de reflexão.

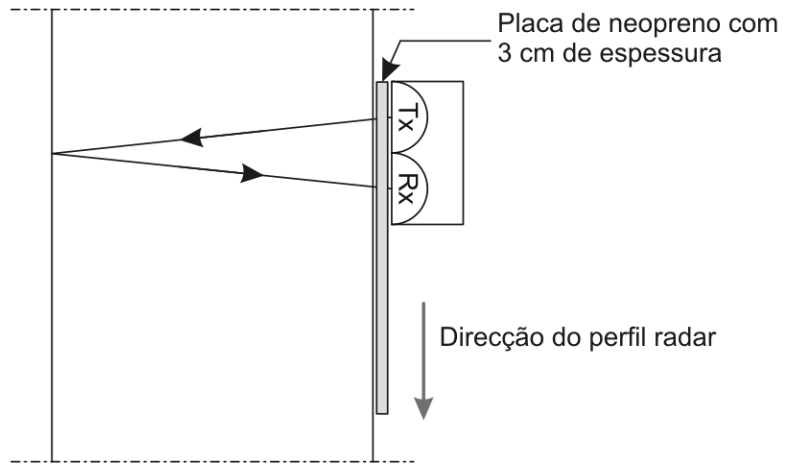


Figura 7 – Metodologia utilizada para adquirir perfis lineares em modo de reflexão sobre a superfície das colunas.

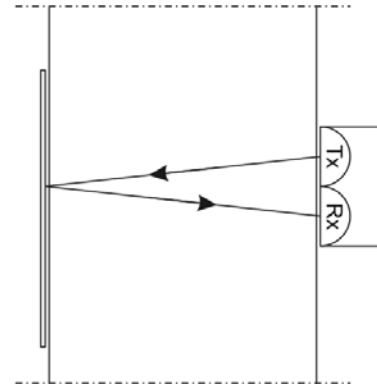
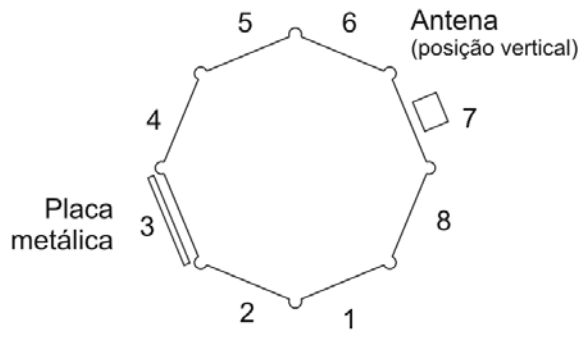


Figura 8 – Metodologia para a determinação da velocidade média de propagação.

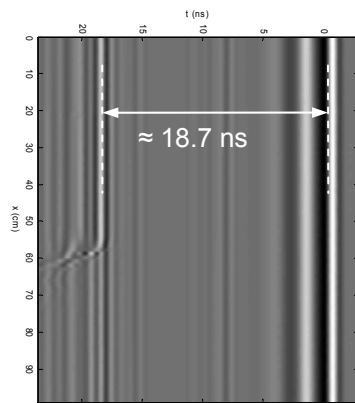


Figura 9 – Medição em tempo sobre o segmento mais elevado da coluna 1.

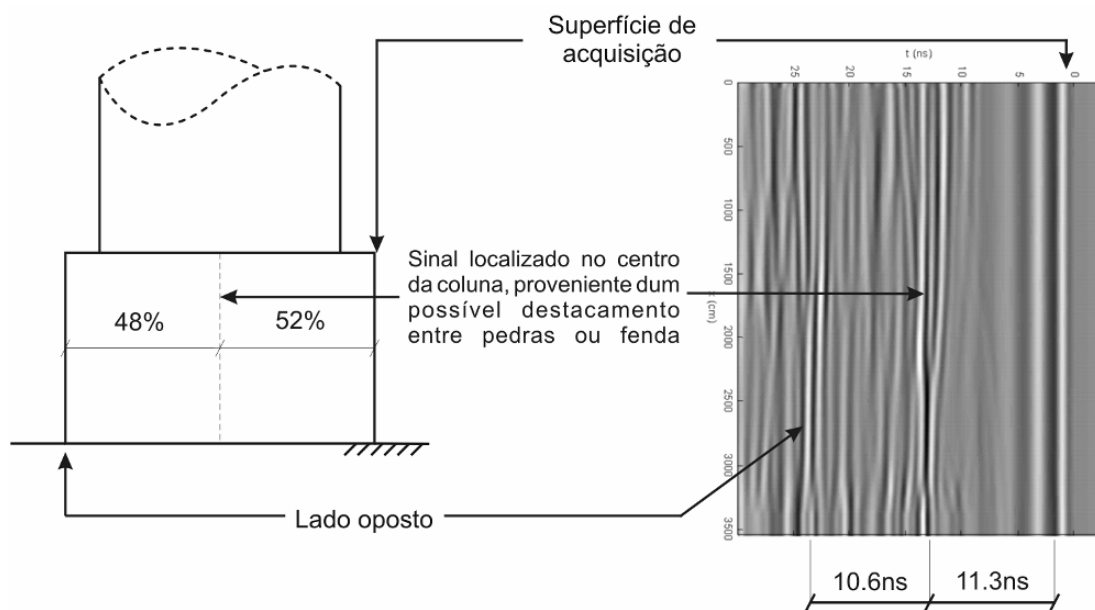


Figura 10 –Radargrama do elemento da base da coluna 1 e da localização relativa dum destacamento notável a cerca de 50 % da superfície de aplicação do georadar.



(a)



(b)



(c)

Figura 11 – Exemplos the juntas / fendas preenchidas com argamassa na base da coluna 1. As fendas irregulares na base da coluna 1 estão em correspondência com a área investigado com o GPR.

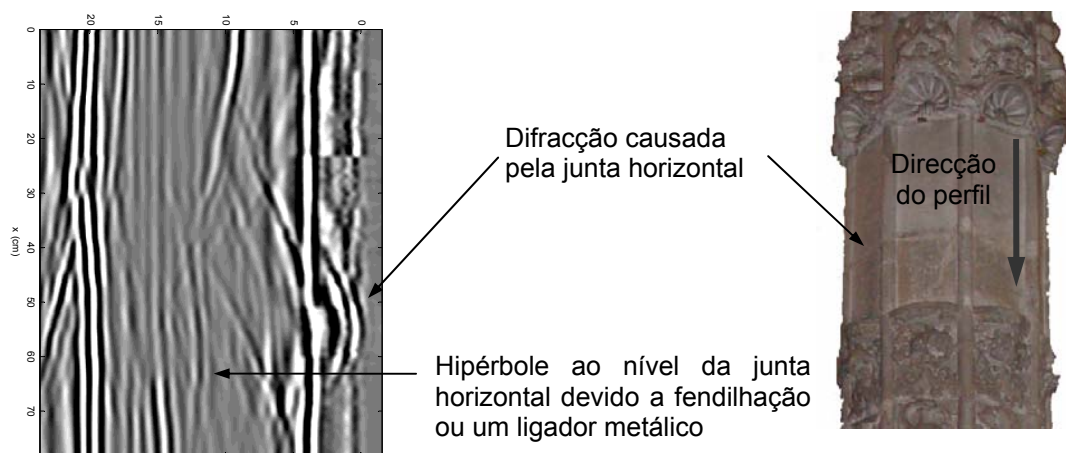


Figura 13 – Radargrama do lado 2 da coluna 1 mostrando a hipérbole de difracção, que corresponde à junta entre segmentos de pedra após subtracção do traço médio.

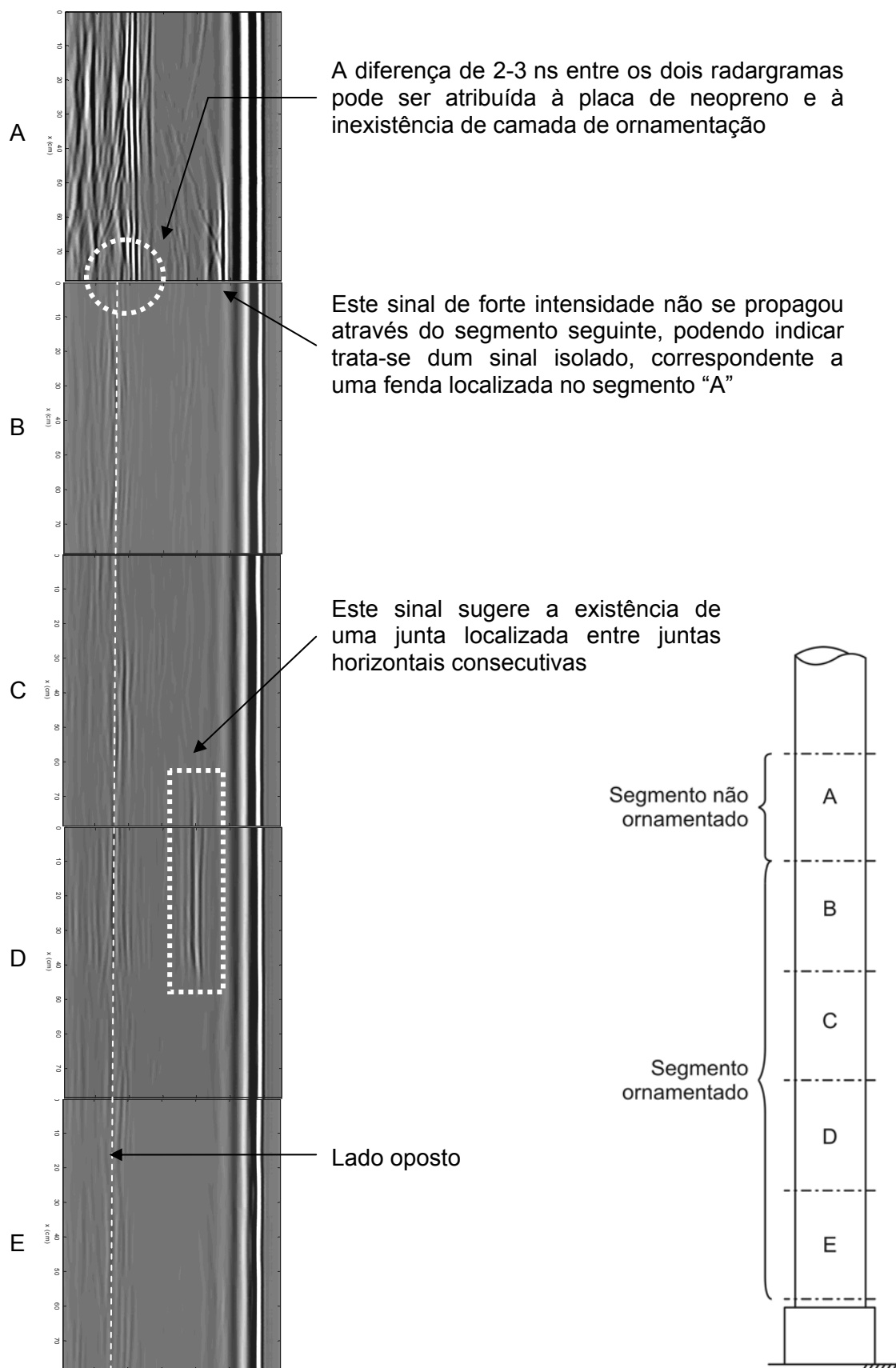


Figura 14 – Radargramas em modo de reflexão ao longo da coluna 1.

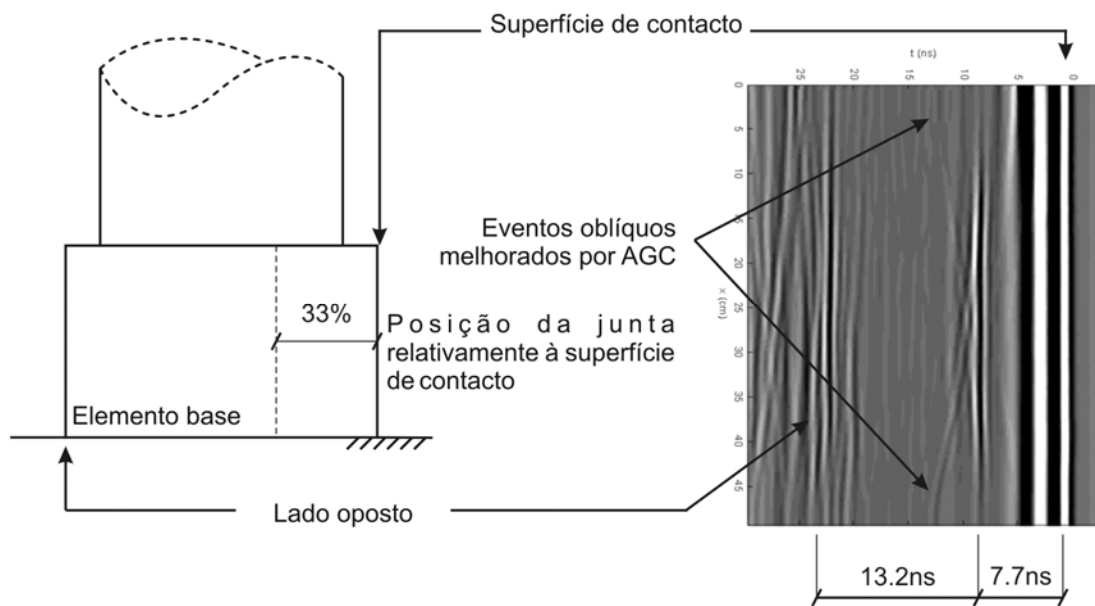


Figura 15 – Radargrama do elemento da base da coluna 2 e da localização relativa dum destacamento notável a cerca de 33 % da superfície de aplicação do georadar.

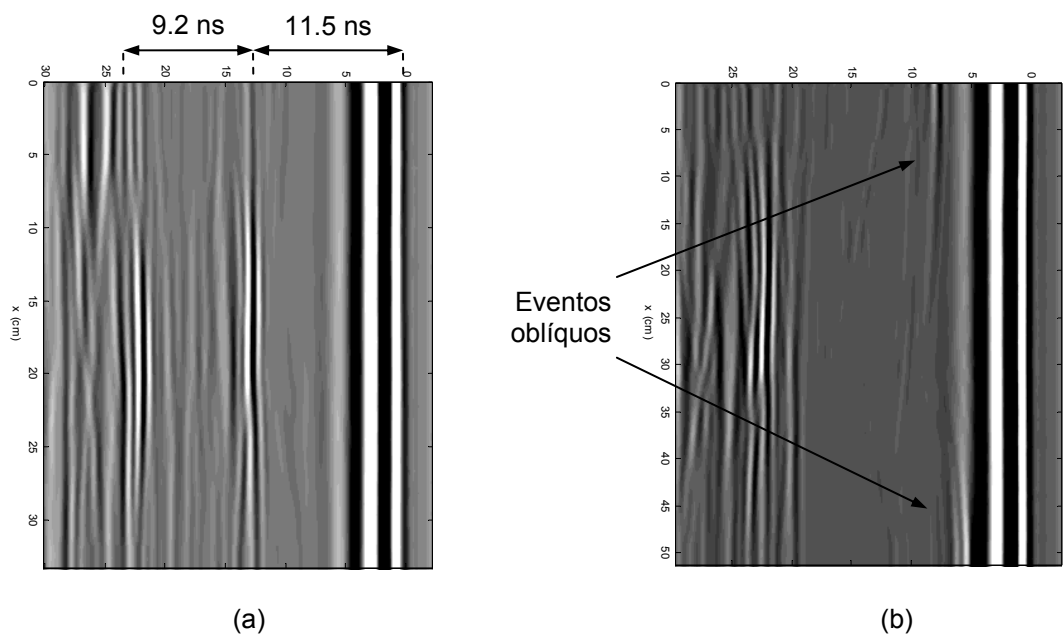


Figura 16 – Perfis dos elementos na base das colunas (a) 3 e (b) 4. Para preservar os sinais horizontais, os dados foram filtrados de maneira a só eliminar o ruído aleatório.

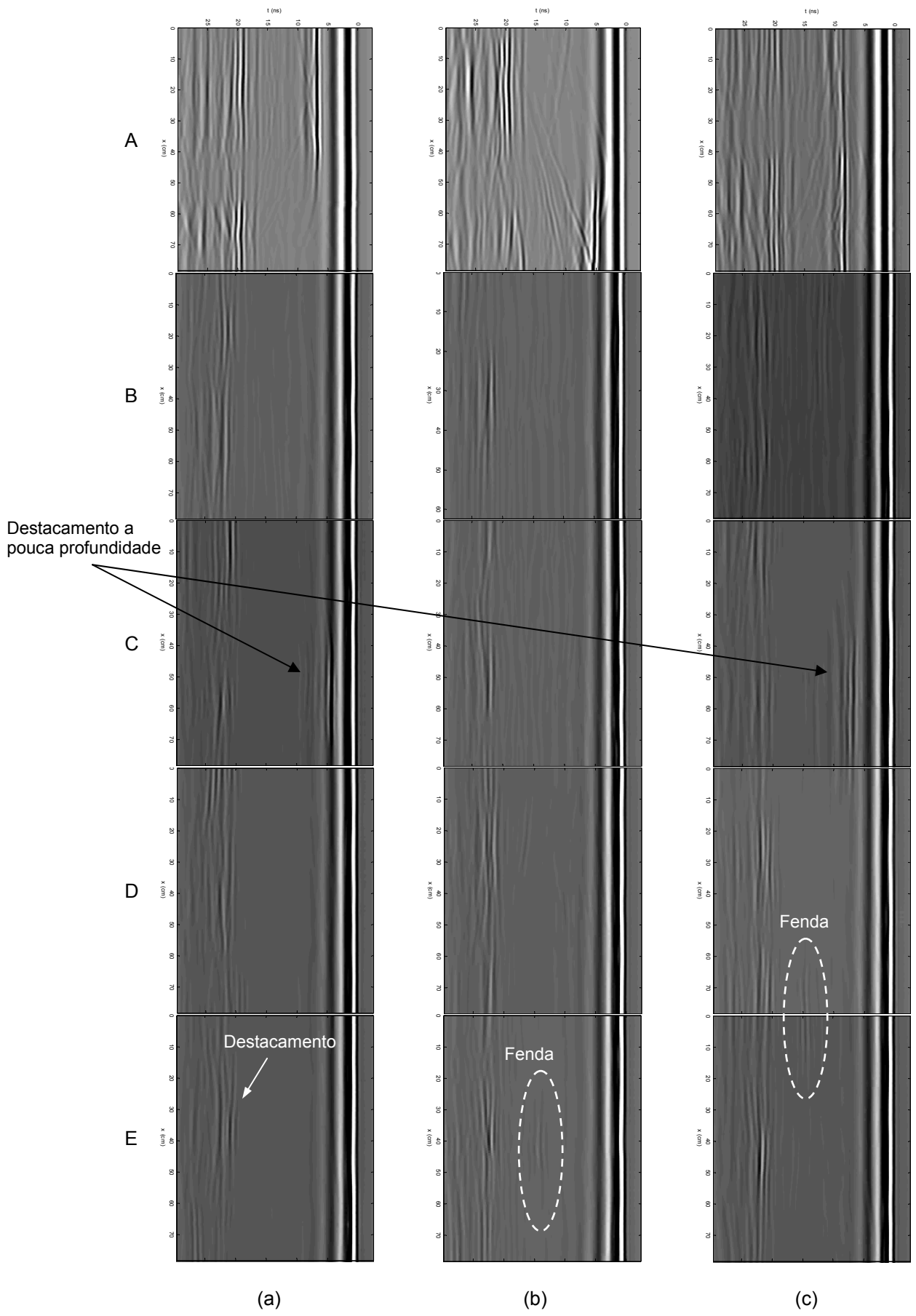


Figura 17 – Radargramas da inspeção em modo de reflexão nas colunas (a) 2, (b) 3 e (c) 4.