

UTILIZAÇÃO DE GEORADAR NA CARACTERIZAÇÃO DA EVOLUÇÃO DO DANÓ ESTRUTURAL DE UMA PAREDE: ENSAIO À ESCALA REAL

CARLOS GRANGEIA

Msc
Universidade de Aveiro,
Departamento de
Geociências
Aveiro - Portugal

HÉLDER TARECO

Msc
Universidade de Aveiro,
Departamento de
Geociências
Aveiro - Portugal

M. SENOS MATIAS

Prof. Catedrático
Universidade de Aveiro,
Departamento de
Geociências
Aveiro - Portugal

H. VARUM

Prof. Associado
Universidade de Aveiro,
Departamento de Civil
Aveiro - Portugal

A. COSTA

Msc
Universidade de Aveiro,
Departamento de Civil
Aveiro - Portugal

SUMÁRIO

Ao longo do tempo o património edificado deteriora-se devido a causas naturais ou antrópicas. A acção sísmica é um factor que pode provocar danos estruturais nas paredes das construções tradicionais, por vezes até imperceptíveis à vista desarmada.

A Geofísica aplicada proporciona técnicas de elevada resolução que permitem detectar alvos de pequenas dimensões, como por exemplo fendas na estrutura interna de paredes. O georadar, técnica não invasiva, utiliza impulsos electromagnéticos de frequências variando de dezenas de MHz a GHz que permitem uma elevada resolução dos meios a investigar. A utilização destas técnicas na caracterização interna de paredes exige a utilização de gamas de frequências elevadas (> 1GHz) de forma que pequenas fissuras sejam detectadas. A evolução do dano de uma estrutura tradicional de alvenaria sujeita a diferentes solicitações, como as acções sísmicas, pode ser monitorizada por medidas de georadar. Por outro lado, poderá ainda ser viável a utilização de medidas de georadar na avaliação da eficácia de soluções de reparação de fissuras por injeção de caldas.

Na região de Aveiro as paredes estruturais eram tradicionalmente realizadas em adobe. Para avaliar a viabilidade da aplicação do georadar na caracterização interna destas estruturas, no Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro foi construída uma parede em adobe, com blocos de adobe recuperados das construções existentes, e segundo as técnicas e métodos tradicionais. Esta parede foi inicialmente sujeita a uma solicitação cíclica de amplitude crescente que lhe produziu danos estruturais significativos. Estes danos foram posteriormente reparados com recurso à injeção de uma calda à base de cal hidráulica. Após reparação dos danos, a parede foi reforçada com uma malha polimérica embebida no reboco e esta foi sujeita a um ensaio cíclico de amplitude crescente até ao seu colapso.

Foram recolhidos dados de georadar (1.6 GHz) sobre a parede, antes e durante o ensaio da parede reforçada, que permitiram caracterizar os danos iniciais, a eficiência da injeção da calda na colmatação das fissuras e a evolução dos danos estruturais provocados ao longo do ensaio.

Os resultados são discutidos e permitem justificar plenamente a utilização do georadar na caracterização interna de estruturas de paredes. Demonstra-se que o georadar é uma ferramenta não intrusiva de elevada resolução a utilizar na avaliação do dano em construções existentes.

1. INTRODUÇÃO

Os métodos de prospecção geofísica têm sido aplicados com sucesso na resolução de diversos problemas de Engenharia tais como caracterização de maciços rochosos e estudos de locais para a implantação de grandes obras. Mais recentemente a localização de fracturas em estruturas e a caracterização da resposta dinâmica de edifícios a solicitações tornaram-se áreas de interesse da aplicação daqueles métodos.

Como os métodos de prospecção geofísica são técnicas não invasivas a sua aplicação tem particular importância em estudos de reabilitação, preservação e manutenção de edifícios antigos, assim como na investigação da resposta de construções a solicitações sísmicas.

No distrito de Aveiro, blocos de adobe são abundantes em edifícios urbanos e rurais, muitos dos quais têm interesse histórico e valor cultural e arquitectónico. Contudo, muitos destes edifícios apresentam danos estruturais importantes devido à falta de manutenção e ao insuficiente conhecimento do comportamento mecânico deste tipo de estruturas [3]. Por isso, é necessário estudar e analisar este importante património, em particular, no que diz respeito à sua resposta a acções sísmicas [4].

Para este efeito, no Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro, foi construída uma parede de adobe à escala 1:1, esquerda na Fig. 1, representativa das construções típicas locais. Os adobes têm um peso volumétrico de 16kN/m³ e dimensões 29x45x12cm. Na construção da parede foi usado um cimento de composição semelhante ao utilizado nas construções da região. Este material foi também usado como ligante e reboco. A parede tem a forma de I e dimensão total 3,07x3,50x0,33m.

Esta parede foi sujeita a uma série de ensaios mecânicos não destrutivos para caracterização da sua resposta a acções sísmicas. Após estes testes de caracterização, os danos observados foram reparados por injeção de uma calda à base de cal hidráulica nas fracturas, direita na Fig. 1.



Figura 1: Parede de Adobe. Estrutura interna (esquerda). Aspecto após os testes mecânicos e reparação (direita).

Após a reparação, investigou-se a extensão das fracturas na parede, bem como, a eficiência e extensão da injeção da calda no seu interior. No entanto, estes objectivos só podem ser atingidos utilizando técnicas não destrutivas.

O desenvolvimento de equipamento de alta resolução, aquisição de dados, processamento e técnicas de modelação aumentou bastante o campo de aplicação dos métodos de prospecção geofísica. Métodos como o georadar, GPR, ultrasons e tomografia de resistividade eléctrica, ERT, são actualmente utilizados com resolução milimétrica e a denominada “micro geofísica” é actualmente uma nova fronteira e desafio na geofísica aplicada [2]. De entre outras técnicas, os métodos de GPR provaram ser eficientes na detecção de fracturas e no controle da injeção de fluidos em edifícios [1].

Este artigo descreve um ensaio de GPR de alta resolução para investigar os danos e a eficiências das técnicas de reparação utilizadas numa parede de adobe sujeita a acções sísmicas.

2. TESTES PRELIMINARES: AQUISIÇÃO DE DADOS E ANÁLISE DE VELOCIDADE

Alguns ensaios teste foram realizados para verificar a aplicabilidade do georadar ao problema e para testar as características geométricas do ensaio. Os dados de GPR foram colhidos em modo biestático, frequência central de 1,6GHz, amostragem espacial de 0,005m, 528 amostras por traço, janela de tempo de 10,44ns e com oito “stacks”.

Os testes preliminares foram realizados sobre um bloco de adobe simples e, também, alguns perfis sobre a parede, pois esperava-se que esta se comportasse como um meio heterogéneo.

Na Fig. 2 mostra-se um perfil de teste sobre um adobe que permitiu avaliar a velocidade de propagação neste meio. Debaxo do bloco colocou-se uma barra de aço com diâmetro de 0,03m, de modo a obter uma resposta

hiperbólica, do tipo evento difractor. Sobre os dados processados o ajuste teórico hiperbólico permitiu calcular uma velocidade de propagação de 0,16m/ns, parte inferior da Fig. 2.

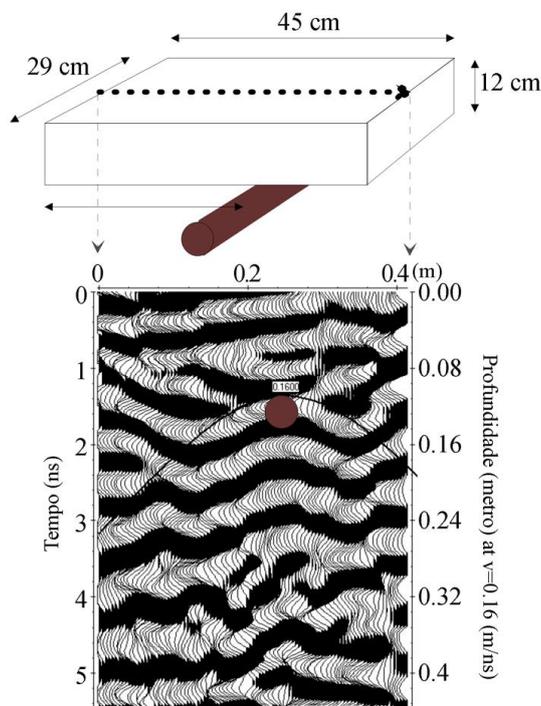


Figura 2: Perfil de teste para obtenção da velocidade média sobre um bloco, usando uma barra metálica como ponto difractor de controlo.

Os perfis teste, P1 a P4, realizados sobre a parede, Fig. 3, foram adquiridos usando duas barras metálicas, com diâmetro 9mm, como reflectores de controlo na face posterior da parede. A projecção destas barras na face anterior da parede é representada pelas linhas púrpura na Fig. 3.

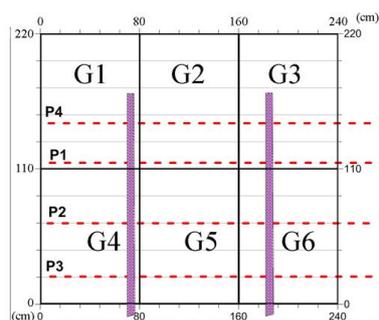


Figura 3: Perfis de georadar P1 a P4 (linhas a vermelho tracejado), de controlo de velocidade e projecção da posição das barras metálicas (linhas púrpura).

Os radargramas processados na Fig. 4, mostram os dados GPR para os perfis P1 e P2. Como se vê não é fácil identificar ambas as hipérbolas de difracção, o que se deve ao elevado grau de heterogeneidade do material da parede. No entanto, de ambas as hipérbolas é possível calcular uma velocidade de 0,15m/ns, o que é um valor inferior ao interpretado para o adobe, Fig. 2. Isto pode justificar-se pela heterogeneidade da parede danificada.

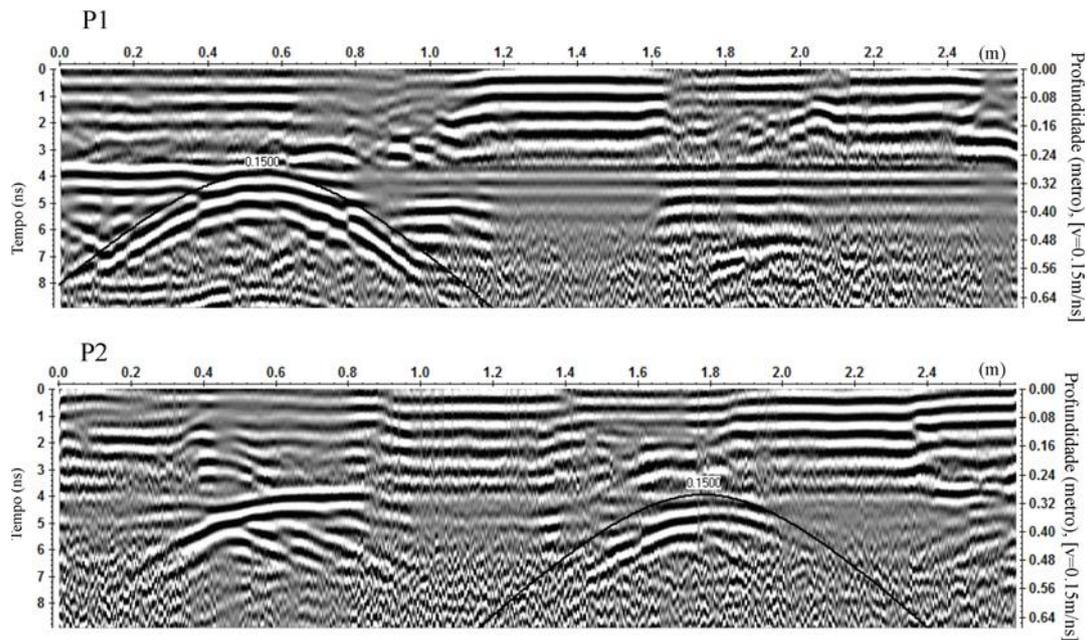


Figura 4: Perfis de georadar P1 e P2 com ajuste de velocidades

A partir dos radargramas da Fig. 4, pode-se interpretar o fim da parede a um tempo de ida e volta (TWT) de cerca de 4ns, como é lido pela posição das hipérbolas. Todavia variações de velocidade devidas à heterogeneidade da parede podem alterar o valor daquele tempo.

3. AQUISIÇÃO DE DADOS

A optimização dos procedimentos de aquisição de dados requereu a divisão da parede em seis rectângulos, G1 a G6 indicadas na Fig. 5. A aquisição de dados foi feita sobre uma malha desenhada em papel, com dimensões 0,8x1,1m, estendido sobre a parede. Deste modo uma superfície total de 2,4x2,2m foi estudada, trasladando a malha de papel sobre a superfície da parede. Os perfis horizontais e verticais foram espaçados de 0,05m e um total de 17 perfis verticais e 23 perfis horizontais foram medidos para cada grelha. Os dados foram colhidos com uma amostragem espacial de 0,005m, 528 amostras por traço, janela de tempo de 10,44ns e 8 stacks. Finalmente as seis grelhas foram montadas numa só de modo a representar a área total amostrada, Fig. 5.

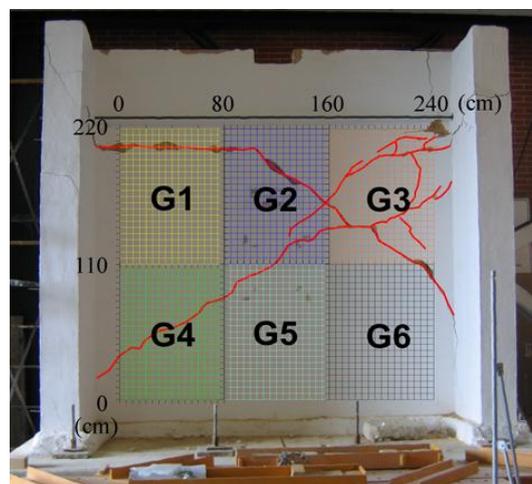


Figura 5: Vista da parede e fracturas visíveis (vermelho)

3.1. Processamento e interpretação

Os dados dos seis rectângulos foram montados num rectângulo único, constituindo um único conjunto de dados. O processamento e interpretação foram efectuados de acordo com a sequência da Fig. 6.

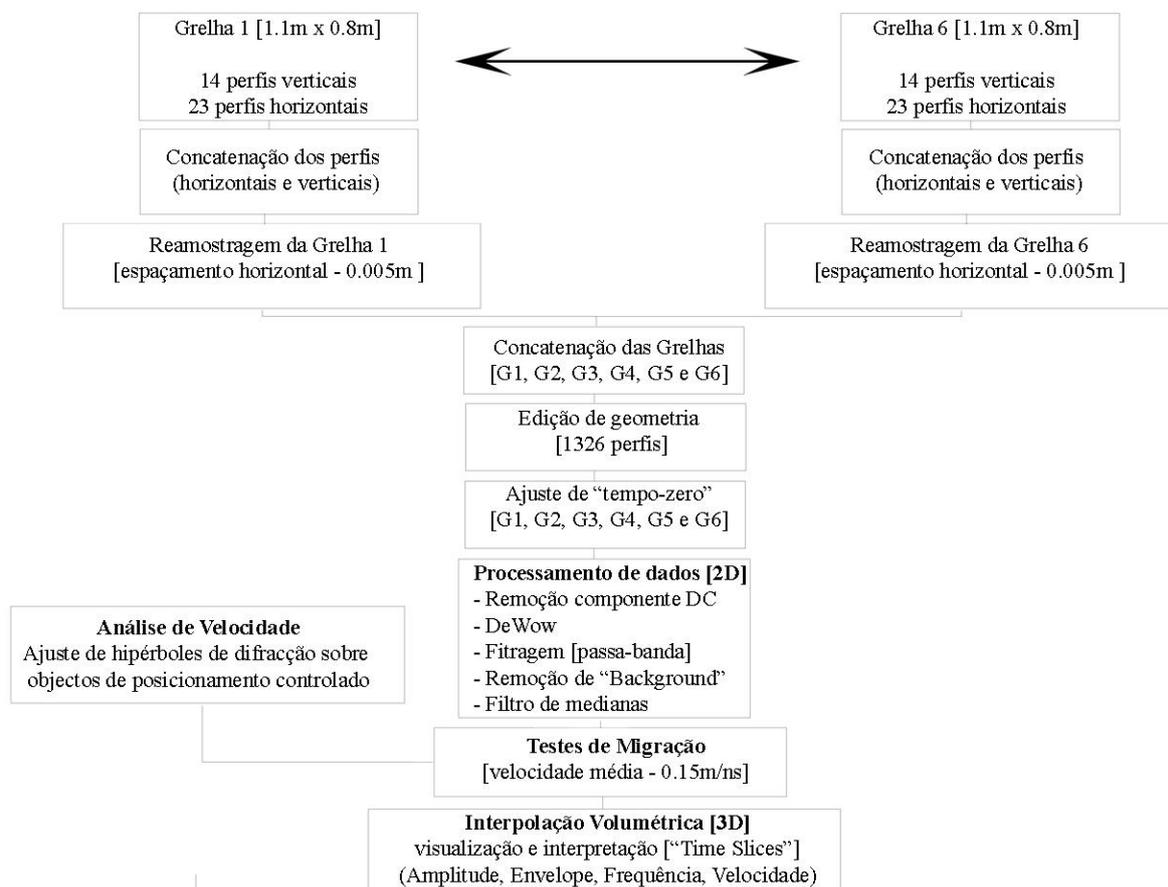


Figura 6: Sequência de processamento de dados de georadar

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados de GPR processados são apresentados em amplitude instantânea (envelope), em diferentes tempos, Fig. 7, distribuição de amplitudes de frequência, Fig. 8, e mapa de distribuição de velocidades, Fig. 9.

4.1. Amplitude instantânea em diferentes tempos ("time slices")

Os dados de amplitude instantânea a diferentes tempos, "time slices" da Fig. 7, mostram os dados em tempos variando de 0,47ns a 5,91ns. Os pontos de injeção de cimento também estão representados pelos círculos a vermelho.

Considerando o leque de tempos apresentados, os dados cobrem o início da parede, incluindo o reboco, até ao fim da parede, eventualmente mais além devido às variações de velocidade dentro da parede.

Como são esperadas variações de velocidade, não é possível fazer corresponder um tempo a uma profundidade. Como primeira aproximação, para uma velocidade constante de 0,13m/ns, os primeiros três tempos (0,47, 0,96 e 1,46ns) devem corresponder à espessura do reboco na face anterior da parede. O tempo 1,96ns deve corresponder à transição do reboco para os blocos de adobe, e os tempos 2,45, 2,95, 3,44 e 3,94 são interpretados como correspondendo ao interior da parede de adobe. Os tempos 4,42 e 4,92ns devem corresponder à face posterior da parede. Por fim, os dois últimos tempos, 5,42 e 5,91ns, devem corresponder a uma região para além

dos limites da parede. Para velocidades superiores ou inferiores e variações locais de espessura os tempos podem conter informação deslocada em profundidade. Por isso, para velocidades menores e espessura local maior, os últimos tempos podem ainda ser posicionados dentro da parede.

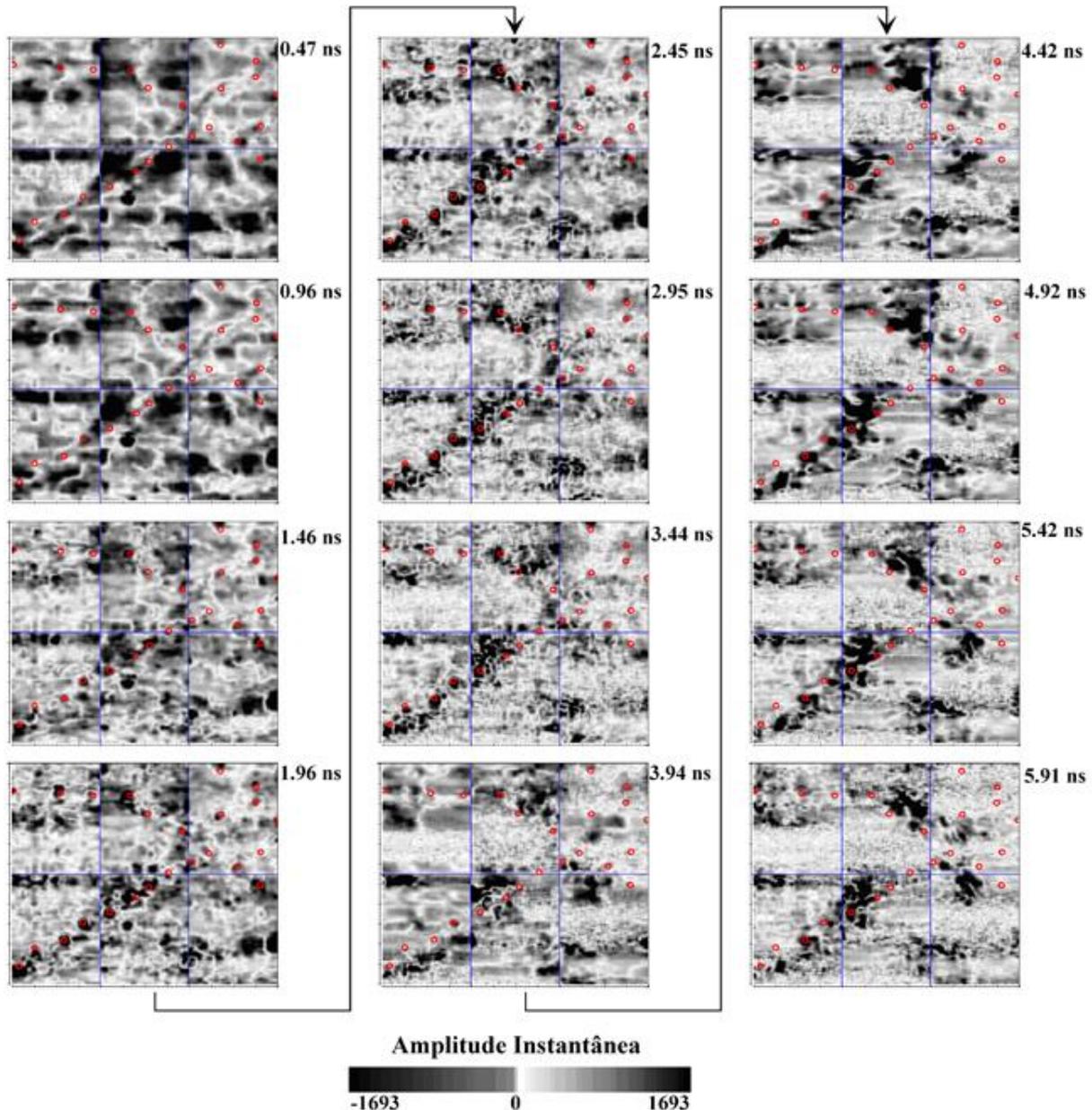


Figura 7: Dados de georadar em tempo (“Time Slices”) e pontos de injeção da calda de cimento

A invasão e migração de cimento na parede, a partir dos pontos dos pontos de injeção, mostram uma assinatura particularmente bem definida entre os tempos 1,96ns e 3,44ns. As assinaturas mais significativas estão sempre nos tempos correspondendo ao interior da parede. Fora destes limites é ainda possível correlacionar algumas áreas sobrepostas com os pontos de injeção. No reboco, tempos de 0,47, 0,96 e 1,46 ns, não há uma clara assinatura para a maior parte dos pontos de injeção.

A evolução da assinatura dos pontos de injeção revela uma invasão maior com o aumento do tempo, por isso profundidade. Assim, a eficiência da reparação aumenta dentro da parede, mas limitada de alguma forma ao zonamento mais próximo dos pontos de injeção.

As fracturas observadas à superfície da parede podem ser identificadas nos tempos da Fig. 7, e correspondem aos alinhamentos de amplitude instantânea mais elevada (alinhamentos escuros). No entanto existem outros alinhamentos que podem corresponder a fracturas desconhecidas, possivelmente encobertas pelo reboco.

4.2. Distribuição da amplitude de frequências

A amplitude de frequências, para 1,0, 1,3 e 1,6GHz, estão ilustradas na Fig. 8. De um modo geral as frequências mais elevadas correspondem a uma maior resolução. Como se pode ver na Fig. 8, as três distribuições de amplitudes têm características semelhantes. Assim, as fracturas conhecidas (linhas pretas) são facilmente identificadas e as fracturas correspondem a alinhamentos de pequena amplitude ou a elevados gradientes de amplitude.

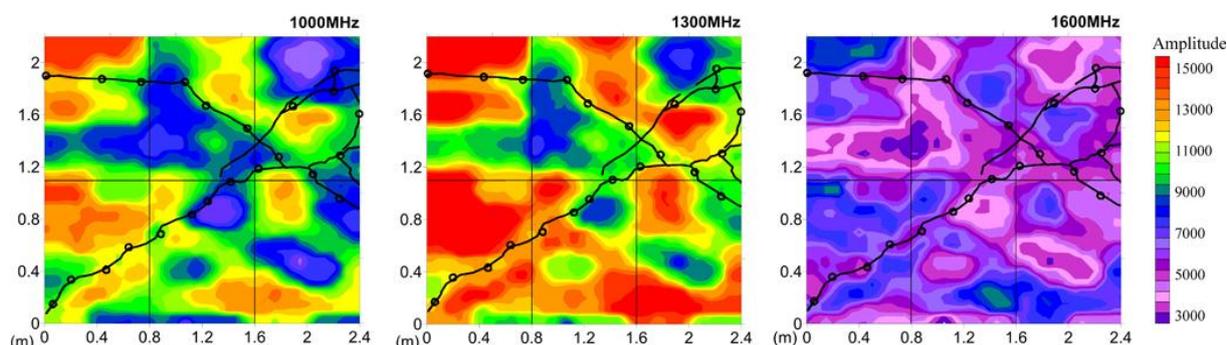


Figura 8: Distribuição de amplitude de frequências

No caso da frequência mais elevada, 1,6 GHz, a localização das fracturas é mais precisa e mais alinhamentos são revelados. É importante salientar que estes são paralelos aos das fracturas conhecidas, o que está de acordo com a Fig. 7.

4.3. Distribuição de velocidades

A distribuição de velocidades na parede está ilustrada na Fig. 9. O mapa foi construído atribuindo a velocidade calculada em cada posição do traço. O cálculo de cada velocidade foi feito usando a diferença entre o tempo correspondendo à primeira chegada no registo e o tempo interpretado para o final da parede, como na Fig. 4, e a espessura medida da parede.

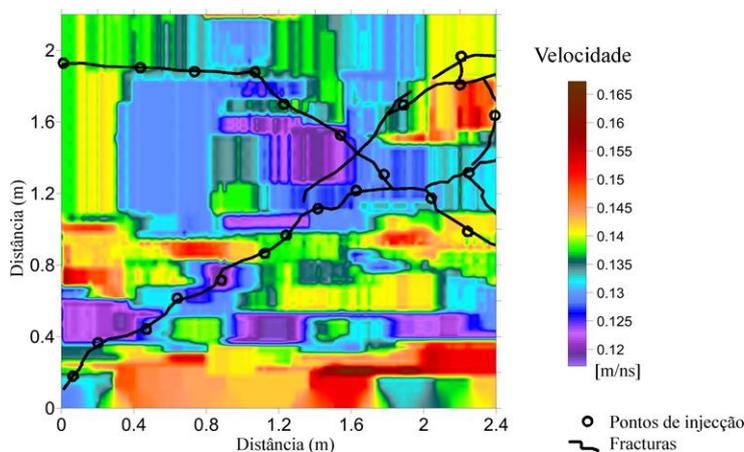


Figura 9: Distribuição de velocidades na parede

Como se pode ver a distribuição de velocidades é muito heterogénea. As velocidades calculadas variam de 0,12m/ns a valores superiores a 0,165m/ns. Existe alguma correlação entre a localização das fracturas e valores mais baixos de velocidade, ou melhor, áreas de velocidade mais baixas. Este comportamento sugere que a resposta em valores da velocidade ocorre numa região à volta da posição das fracturas e não somente sobre as fracturas. A parte inferior do mapa revela um comportamento em mosaicos, com dimensões semelhantes aos dos adobes utilizados na construção da parede. Por isso, nesta região pode-se argumentar que é possível identificar individualmente os adobes a partir da análise de velocidades. Esta interpretação não é possível pela análise das Figs. 7 e 8.

5. GEORADAR EM ENSAIOS DE CARGA - ENSAIOS 4D

Após os ensaios anteriores a parede de adobe foi restaurada e reforçada com malha plástica nas faces posterior e anterior na zona do reboco. Iniciou-se um segundo ciclo de testes com o objectivo de determinar a resposta da estrutura de adobe durante o ensaio de carga mecânico. Sujeitou-se a parede a uma carga vertical constante de 2000 Kg. Os ensaios de georadar foram realizados nos intervalos entre os ensaios mecânicos correspondentes a ciclos de oscilação cuja amplitude máxima foi de 0.25, 0.5, 1.25, 2.5, 5, 12.5 e 25 mm respectivamente.

Foram realizados conjuntos de 9 perfis de georadar, cuja localização se encontra assinalada na Fig. 10, entre cada ensaio mecânico. Na mesma figura, encontram-se ainda representados a localização das áreas anteriores sujeitas a prospecção por georadar, os pontos de injeção da calda nas faces posterior e anterior da parede, as fracturas anteriormente identificadas bem como as fracturas observadas no decurso do ciclo de oscilação de 5 mm durante a nova fase de ensaios mecânicos. Admite-se não ter sido possível o mapeamento integral das fracturas ocorrentes durante os ensaios de solicitação mecânica, uma vez que o reforço estrutural introduzido pela malha polimérica no reboco pode ter camuflado parte da resposta frágil da parede de adobe, em particular no seu interior. Por outro lado, a identificação visual das fracturas, em particular para os ciclos de amplitude mais reduzida, foi apenas possível no máximo das amplitudes, sendo que as mesmas colapsavam aquando da parede em repouso ou em amplitudes muito reduzidas dos ciclos de oscilação.

Os perfis realizados possuem um comprimento máximo de cerca de 2,5 metros e encontram-se espaçados de cerca de 25 cm. Não se realizou a prospecção na totalidade da largura da parede uma vez que, devido às dimensões da antena utilizada, não é possível o acoplamento integral. Por outro lado, não foi possível a utilização mais extensiva do georadar na parede devido à necessidade de redução de tempo entre os ensaios de solicitação dinâmica. O tempo de aquisição para cada conjunto de 9 perfis foi de aproximadamente 7 minutos.

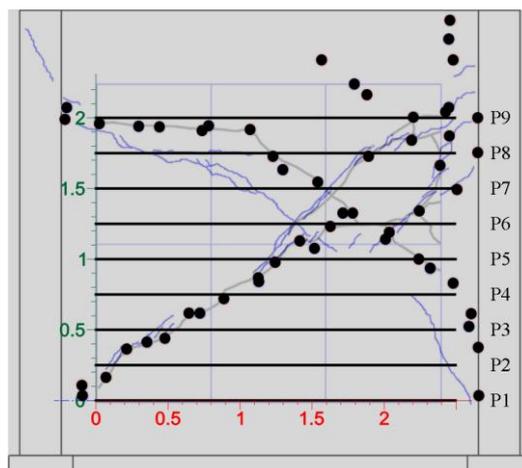


Figura 10: Perfis realizados entre ensaios mecânicos, mapeamento dos pontos de injeção da calda e de fracturas anteriores e posteriormente observadas.

O diagrama de processamento de dados efectuado foi semelhante ao indicado na Fig. 6, em particular no que diz respeito às fases de processamento de dados 2D e interpolação volumétrica. Apresenta-se na fig. 11 a totalidade

dos perfis processados e agrupados de acordo com os testes de solicitação mecânica a que parede foi sujeita. Os radargramas observados apresentam-se em amplitude instantânea também designada por envolvente. De uma forma geral é possível observar um decaimento da energia total de reflexão dos radargramas entre os diversos grupos de registo. O primeiro grupo, que corresponde à resposta de georadar para o primeiro teste de solicitação cíclica de amplitude é considerado como situação de referência.

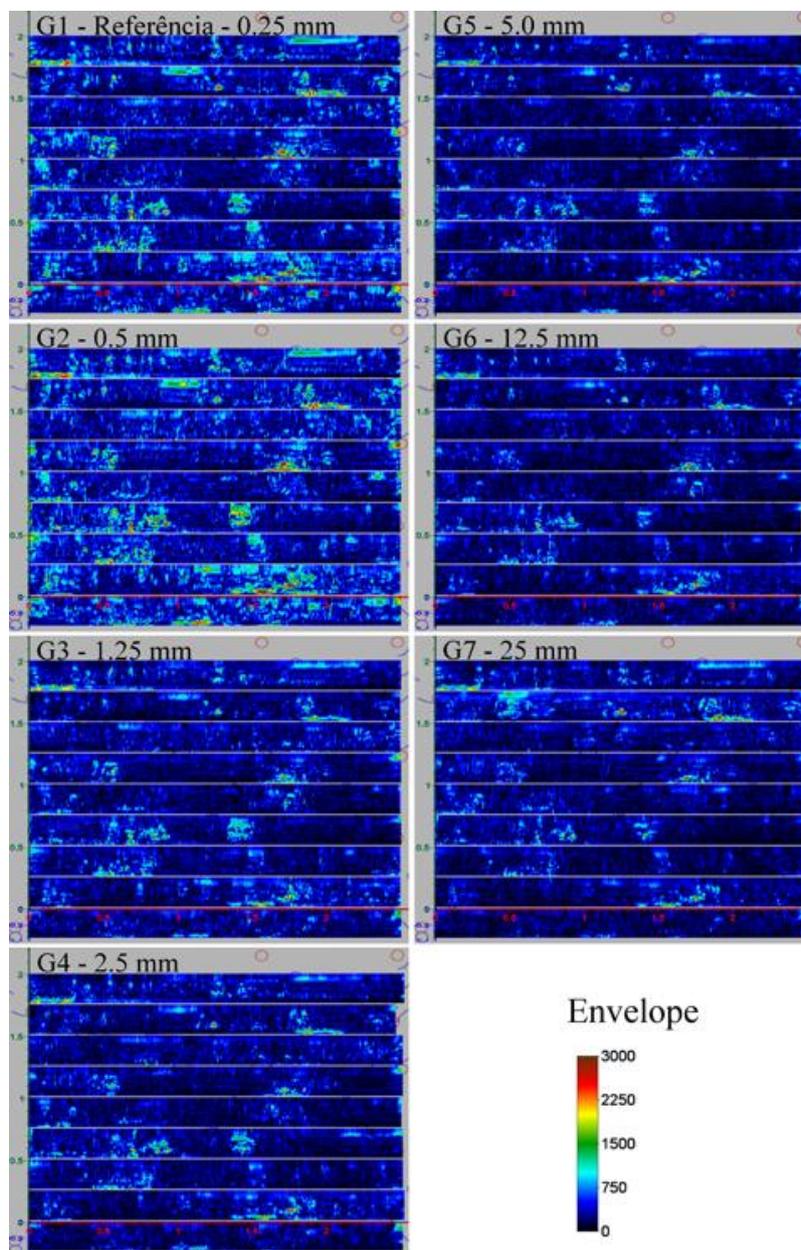


Figura 11: Perfis de georadar (envelope) realizados relativos aos ciclos considerados

Realizou-se uma análise comparativa de sinal entre as diversas fases de registo e para os diversos perfis. A Fig. 12 apresenta um destes resultados que estabelece a diferença das amplitudes instantâneas entre a situação de referência (G1 - ± 0.25 mm), e o registo relativo à última solicitação mecânica registada por georadar (G7 - ± 25 mm). Cada um dos mosaicos apresentados na figura corresponde a um determinado tempo de propagação da onda electromagnética. Os diversos mosaicos apresentados dizem respeito a diferentes tempos de aquisição (“time slices”). A escala de amplitude utilizada foi centrada para as diferenças zero e extremos simétricos. Optou-se ainda por realizar uma suavização das amplitudes com filtro de mediana de forma a realçar possíveis

zonamentos. A distribuição espacial das maiores diferenças de amplitude está associada a tempos de propagação da onda electromagnética relativamente reduzidos ou então elevados. À semelhança das considerações relativas à fig. 7, os posicionamentos temporais 0.1, 0.6 e 1.3 ns deverão corresponder à espessura do reboco da parede de adobe. O mosaico relativo aos 4.3 ns poderá corresponder a registos associados a eventos ocorrentes no lado posterior da parede ainda dentro do reboco. Os restantes mosaicos são interpretados como correspondentes ao interior da parede. Comparativamente é de notar uma relativa semelhança entre os eventos de maior amplitude posicionados nos mosaicos correspondentes aos tempos 3.9 e 4.3 ns.

É ainda possível observar concordância entre os alinhamentos relativos à fracturação registada e os alinhamentos de amplitude mais significativa.

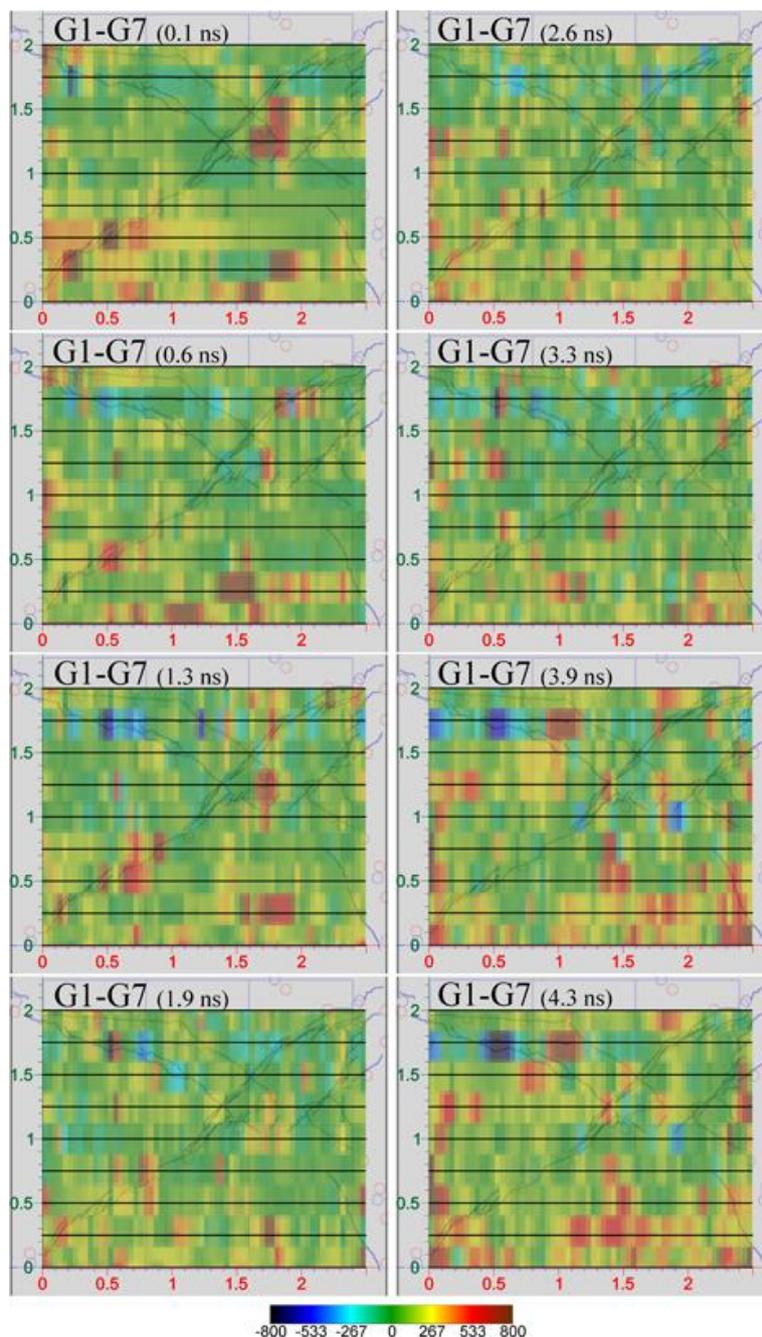


Figura 12: Mosaico “timeslices” relativo às diferenças de amplitude instantânea entre a situação de referência (G1 - ± 0.25 mm) e o último registo de georadar (G7 - ± 25 mm).

Realizou-se o espectro de frequências do sinal processado e, no mesmo contexto de análise entre a situação de referência (G1 - ± 0.25 mm) e o último registo de georadar (G7 - ± 25 mm), determinou-se a diferença de amplitudes para frequências escolhidas de forma arbitrária para além da estabelecida na frequência nominal da antena utilizada. A fig. 13 apresenta as diferenças de amplitude para as frequências 888, 1630, 2370 e 3111 MHz. Optou-se por frequências mais elevadas que as estabelecidas para a fig. 8 no sentido de explorar a vantagem da atenuação diferencial da onda electromagnética nos meios atravessados, e ainda de forma a compensar a relativa falta de amostragem de dados pelo número comparativamente reduzido de perfis efectuados nesta segunda fase de ensaios mecânicos. Da análise da figura observa-se efectivamente um acréscimo de detalhe associado ao aumento da frequência. É de referir o relativo baixo contraste de amplitude para a frequência mais baixa (888 MHz), no entanto, observa-se que de uma forma geral a distribuição espacial das amplitudes mais elevadas tem equivalência local com a variação de amplitudes observada para as frequências mais elevadas (1630, 2370 e 3111 MHz).

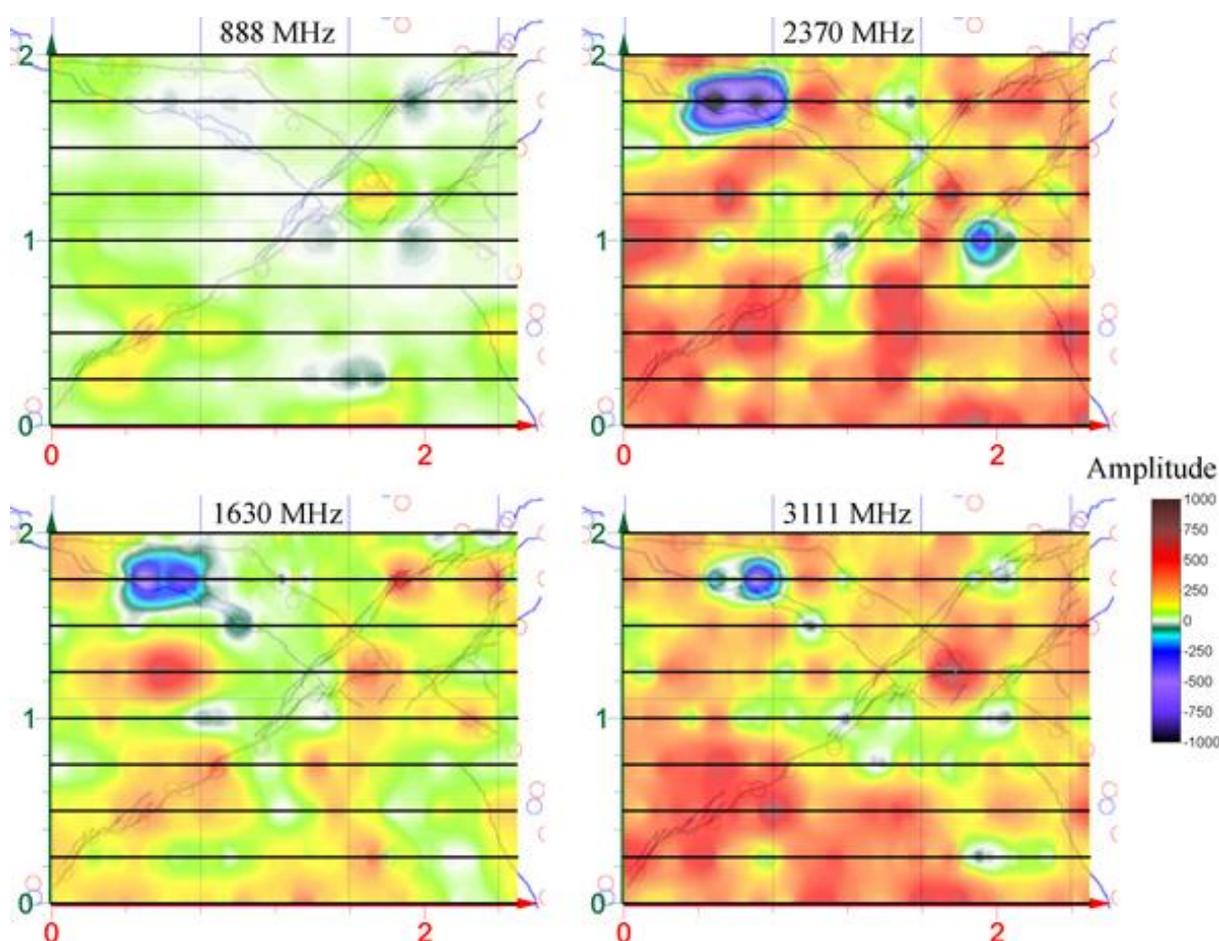


Figura 13: Mosaico relativo a diferenças de amplitude para os 888, 1630, 2370 e 3111 MHz entre a situação de referência (G1 - ± 0.25 mm) e o último registo de georadar (G7 - ± 25 mm).

O padrão associado à distribuição das amplitudes é similar aos das fracturas identificadas aquando da reparação da parede de adobe (primeira fase) bem como às identificadas no decorrer do segundo ensaio mecânico. A propagação do dano parece estar relacionada com os máximos, com os mínimos ou ainda com as isolinhas de diferença de amplitude formando padrões semelhantes às direcções dos danos observados à superfície da parede.

6. CONCLUSÕES

Estes ensaios demonstram as vantagens da utilização do GPR no estudo de danos estruturais em construções bem como na análise da eficiência das técnicas de reparação usadas.

Na primeira fase de testes a análise dos dados de GPR permitiu localizar as fracturas conhecidas e revelar outras em que existem danos potenciais. A injeção de cimento foi detectada e a sua penetração na parede também foi caracterizada. Por fim o uso da distribuição de velocidades na parede mostrou claramente a sua heterogeneidade e permitiu a identificação individual dos adobes.

A análise dos dados do georadar, provenientes das várias fases do ensaio de solitação mecânica em tempo real, revelou variações temporais das propriedades eléctricas da parede de adobe associadas aos ciclos de carga/descarga. O mapeamento das mesmas é correlacionável com a distribuição das fracturas decorrentes dos ensaios de solitação mecânica.

O mais completo conhecimento dos danos e da eficiência das técnicas de reparação só foi possível a partir de uma análise integrada dos dados incluindo domínios tempo, frequência e análise de velocidades dos dados de georadar.

Uma vez demonstrado o uso do georadar neste caso é de esperar que ensaios de georadar de elevada resolução possam ser muito importantes no estudo de danos estruturais, técnicas de reabilitação e monitorização de testes mecânicos, isto é simulação de eventos sísmicos.

7. REFERÊNCIAS

- [1] Anzani, A., Binda, L., Lualdi, M., Tedeschi, C. and Zanzi, L. (2006) Use of Sonic and GPR Tests to Control the Effectiveness of Grout Injections of Stone Masonry. ECNDT 2006, Th.2.4.3.
- [2] Cosentino, P.L. and Deganello, S. (2003) High-resolution microgeophysics: a fascinating challenge. Detection of thin patinas. *Bollettino di Geofisica Teorica e Applicata*, 44, 165-179.
- [3] Martins, T. and Varum, H. (2006) - Adobe's Mechanical Characterization in Ancient Constructions: The Case of Aveiro's Region. *Materials Science Forum*, 514-516. Trans Tech Publications, Switzerland, 1571-1575.
- [4] Varum, H., Costa, A., Martins, T., Pereira, H., Almeida, J., Rodrigues, H. and Silveira, D. (2007) Structural behaviour characterization of existing adobe constructions in Aveiro. *First Euro-Mediterranean Regional Conference – Traditional Mediterranean Architecture: Present and Future*, Reference No. 090, 470-471.