

Evaluation of the GPR (1.2 GHz) technique in the characterization of masonry shells of the Theatro Municipal do Rio de Janeiro

Avaliação da técnica de GPR (1,2 GHz) na caracterização das cascas em alvenaria do Theatro Municipal do Rio de Janeiro

D. C. B. CINTRA ^a
daniellicbc@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0003-4246-894X>

P. M. B. MANHÃES ^a
paola_manhaes@yahoo.com.br
<https://orcid.org/0000-0001-7539-2879>

F. M. C. P. FERNANDES ^b
fmcpf@civil.uminho.pt
<https://orcid.org/0000-0002-7575-411X>

D. M. ROEHL ^a
droehl@puc-rio.br
<https://orcid.org/0000-0003-4644-120X>

J. T. ARARUNA JÚNIOR ^a
araruna@puc-rio.br
<https://orcid.org/0000-0002-4066-1765>

E. S. SÁNCHEZ FILHO ^c
emilsanchez@uol.com.br
<https://orcid.org/0000-0001-6749-9967>

Abstract

The geometric characterization and evaluation of structural integrity are challenges for the preservation of historical buildings. The challenges are associated to the lack of constructive records, material diversity, access and contact restrictions, and sample extraction. Non-destructive tests are indicated in these cases. The objective of this paper is to evaluate the Ground Penetrating Radar (GPR) technique with 1.2 GHz antenna in the study of the determination of material thickness and discontinuities in the masonry shells of the Theatro Municipal do Rio de Janeiro, a heritage built in early 20th century, with high historical and cultural value. With paintings by renowned artists on their intrados, the domes and vault of brick masonry were at risk of collapse in the 1970s due to differential settlements in the supports and moisture, compromising their paintings. A strengthening intervention was carried out in 1976. Considering the masonry of bricks the main component, the electromagnetic wave propagation velocity was determined as 0,15 m/ns in one of the support walls, allowing to estimate the thicknesses of the elements ranging between 20 and 31 cm. Materials incorporated into the structure were identified: reinforcement, metal inserts and bricks. However, the frequency of the antenna did not allow the detection of damages. The application of the GPR to the characterization of materials and investigation of the integrity of the domes of the Theatro Municipal highlights the potential of this technology to study heritage and other constructions.

Keywords: Ground Penetrating Radar (GPR), dome, vault, historical buildings, Theatro Municipal do Rio de Janeiro.

Resumo

A caracterização geométrica e avaliação da integridade estrutural são desafios para a preservação de edifícios históricos. Os desafios estão associados à escassez de registros construtivos, diversidade de materiais, restrições de acesso, contato e extração de amostras. Nesses casos são indicados ensaios não destrutivos. Este trabalho tem como objetivo avaliar a técnica do Ground Penetrating Radar (GPR), com antena de 1,2 GHz, na determinação de espessuras e descontinuidades nas cascas em alvenaria do Theatro Municipal do Rio de Janeiro, patrimônio construído no início do século XX, de elevado valor histórico e cultural. Com pinturas de artistas renomados em seu intradorso, as cúpulas e abóbada em alvenaria de tijolos estiveram em risco de colapso na década de 1970 devido a recalques diferenciais e umidade, comprometendo as pinturas. O reforço da estrutura com concreto projetado foi realizado em 1976. Considerando a alvenaria de tijolos o principal componente, a velocidade de propagação de onda eletromagnética foi determinada em 0,15 m/ns em uma das paredes de apoio, permitindo estimar a variação entre 20 e 31 cm nas espessuras dos elementos estudados. Foram mapeados outros materiais incorporados à estrutura como armadura, chumbadores e tijolos, porém a frequência da antena não permitiu a detecção de danos. A aplicação do GPR para a investigação de integridade e caracterização de materiais das cúpulas do Theatro Municipal mostra o potencial dessa técnica para estudos de patrimônio histórico e de outras construções.

Palavras-chave: Ground Penetrating Radar (GPR), cúpula, abóbada, construções históricas, Theatro Municipal do Rio de Janeiro.

^a Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Rio de Janeiro, RJ, Brasil;

^b Universidade Lusitana – Norte, Faculdade de Engenharia e Tecnologias, Vila Nova de Famalicão, Portugal;

^c Universidade Federal Fluminense, Niterói, RJ, Brasil.

1. Introdução

Segundo o Conselho Internacional de Monumentos e Sítios, a preservação de edifícios de patrimônio histórico possui um caráter multidisciplinar e a análise estrutural pode ser útil para estimar o estado de conservação da construção, assim como para avaliar a eficiência de técnicas de intervenção [1]. Nesse contexto, a caracterização e avaliação da integridade dos elementos estruturais se torna fundamental, embora seja uma tarefa geralmente complexa devido à escassez de registros construtivos e de intervenções, além de existirem restrições de acesso, contato e especialmente de extração de amostras.

Os ensaios não destrutivos são recursos investigativos que não causam danos permanentes ao elemento ensaiado, não provocando perda da sua capacidade resistente. Esses ensaios são de grande valia para o estudo de patrimônio histórico, o qual não pode ser submetido a alterações que comprometam sua autenticidade. Sem testemunhos e sem conhecer as propriedades dos materiais e dimensões dos elementos, a exatidão das informações obtidas nos ensaios não destrutivos é consideravelmente comprometida. Porém, segundo Balayssac et al. (2012) e Milovanovic e Pecur (2016) [2,3], a combinação entre vários ensaios, os cuidados na execução dos mesmos e o conhecimento dos fatores que influenciam nos resultados podem facilitar a interpretação dos dados e validar a estimativa das informações desejadas. O *Ground Penetrating Radar* (GPR) é considerado por Benedetto e Benedetto (2014) uma das tecnologias de detecção remota disponíveis mais eficientes e promissoras para aplicações na engenharia civil [4]. Por não ser invasivo, é uma técnica de investigação recomendada por vários pesquisadores para o trabalho de inspeção e diagnóstico em fundações [5,6], pavimentação em concreto [7–9], tabuleiros de pontes em concreto [10–14]. O GPR é também empregado em estruturas antigas, especialmente em alvenaria de pedra e de tijolos, a fim de mapear características

internas da estrutura e avaliar a homogeneidade do material constituinte [15–19]. Em condições adequadas de ensaio, o GPR pode fornecer informações realistas sobre a forma e posição de alvos no interior de elementos da construção.

As antenas de alta frequência (≥ 1000 MHz) utilizadas na aquisição de dados de GPR permitem a verificação da geometria de estruturas, a detecção de armaduras, bainhas e cabos de protensão, elementos metálicos em geral, a presença de delaminação e de umidade [6], além de indicar áreas afetadas por corrosão [13]. Em alvenaria, a combinação de técnicas bidimensionais de reflexão de GPR com técnicas tridimensionais e outros métodos de ensaios não destrutivos permitem detectar vazios, espessura de paredes, abóbadas, cúpulas, arcos, enchimentos em pontes e em cascas, elementos metálicos e danos [6].

Uma das maiores referências do patrimônio material brasileiro, o Theatro Municipal do Rio de Janeiro (Figura 1), exerce importante papel para a cultura carioca e nacional, sendo dirigido pela Fundação Theatro Municipal do Estado do Rio de Janeiro. Foi construído entre 1905 e 1909, simultaneamente a outros edifícios monumentais do entorno como a Biblioteca Nacional, Museu Nacional de Belas Artes, antiga Caixa de Amortização, que juntos são tombados pelo Instituto de Patrimônio Histórico e Artístico Nacional (IPHAN) como conjunto arquitetônico da Avenida Central, desde 1973 [20]. Além desses edifícios destacam-se também o Clube Naval e o Palácio Monroe (demolido em 1976), construídos na mesma época, num esforço do prefeito Pereira Passos de construção da Avenida Central para a modernização da cidade, que na época era a capital do país. Cintra *et al.* descrevem o sistema de construção do edifício do Theatro e a anamnese das intervenções estruturais ocorridas ao longo dos anos [21].

Com pinturas de artistas renomados como Eliseu Visconti e Henrique Bernardelli no intradorso, as cúpulas laterais e a abóbada em alvenaria de tijolos do Theatro Municipal do Rio de Janeiro (Figura 2) são objetos de estudo de monitoramento estrutural preventivo



(a)



(b)

Figure 1

(a) Foto de Augusto Malta da construção da cobertura, 1906; (b) fachada atual

Fonte: O Theatro Municipal – História. In: <http://www.theatromunicipal.rj.gov.br/sobre/historia/>, acesso: 10/12/2016

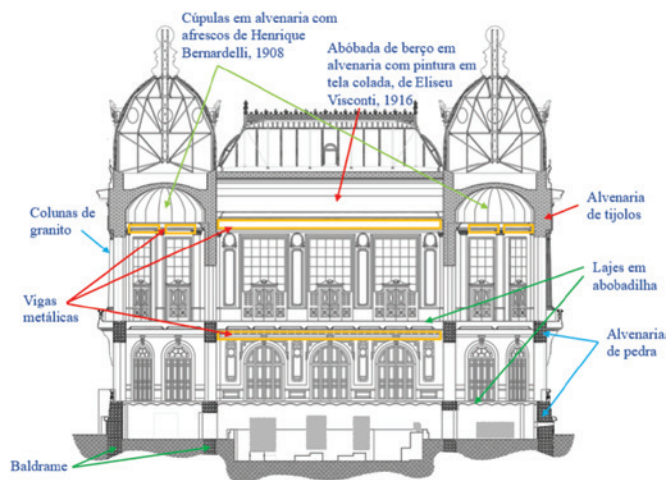


Figura 2
Corte transversal da área nobre do Theatro Municipal do Rio de Janeiro

Fonte: Adaptado a partir de desenho arquitetônico [29]

em construções históricas da PUC-Rio que, numa campanha de ensaios não destrutivos para caracterização da estrutura, contou com o grupo de construções históricas da Universidade do Minho para a análise dos resultados do ensaio de GPR.

Este trabalho tem como objetivo avaliar a técnica de GPR, com antena de 1,2 GHz, para a determinação de espessuras e discontinuidades das cascas em alvenaria do TMRJ. Aplicou-se a técnica de GPR para estimar a espessura total das cascas, de suas camadas constituintes e aferir as dimensões dos tijolos com dados de outros ensaios, assim como detectar eventuais materiais incorporados aos elementos e danos. As informações obtidas no programa experimental foram usadas em etapa subsequente de modelagem numérica para análise não linear da estrutura pelo método dos elementos finitos, a fim de investigar possíveis causas de danos e avaliar a eficiência de medidas de intervenções já realizadas. Apresentam-se os conceitos relevantes da técnica de GPR, cuja compreensão é

fundamental para a adequada aplicação em alvenaria típica de edifícios históricos, metodologia do levantamento e análise de dados, assim como conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2. Aspectos teóricos e experimentais de ensaios de GPR

O GPR é uma técnica não destrutiva com princípios na propagação de ondas eletromagnéticas e tem sido usado, entre outras aplicações, para a avaliação da integridade de estruturas em concreto, madeira, túneis, pontes e pavimentos rodoviários, assim como na inspeção de estruturas históricas. A técnica utiliza dispositivos capazes de registrar o fluxo de transmissão e recepção das ondas eletromagnéticas que se propagam no meio e se refletem ao incidirem em elementos com propriedades de contraste. Com isso, torna-se possível identificar discontinuidades, obter o perfil de camadas de diferentes materiais abaixo de uma superfície, ou até mesmo classificar a geometria de um alvo oculto como sendo de faces planas, longo, fino, esférico ou cúbico, em caso de condições favoráveis de ensaio [25].

2.1 Princípios físicos

A técnica baseia-se no fato de que a velocidade e amplitude de propagação das ondas eletromagnéticas variam significativamente entre os materiais. Portanto, um sinal transmitido em dois materiais diferentes, percorrendo a mesma distância, chegará em momentos diferentes. A velocidade e a forma como as ondas se propagam, refletem e atenuam no meio dependem das propriedades dielétricas dos materiais, relacionadas à capacidade de armazenar carga elétrica na presença de um campo elétrico. A Tabela 1 apresenta os valores típicos da constante dielétrica relativa e condutividade elétrica estática para uma frequência de antena de 100 MHz, além da velocidade e atenuação de onda em materiais comuns. A expressão geral para a velocidade de propagação de um pulso de onda em materiais homogêneos e isotrópicos é dada pela Equação 1 [22,25]:

$$v_r = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (1)$$

Tabela 1
Propriedades eletromagnéticas de alguns materiais

Material	Constante dielétrica relativa (ϵ_r)	Condutividade elétrica (σ) mS/m	Velocidade de onda (v) m/ns	Atenuação de onda (α) dB/m
Ar	1	0	0,300	0
Água	78 (25°C) a 88	0,1 a 10	0,032 a 0,034	0,01
Água do mar	81 a 88	4000	0,032 a 0,033	103
Areia seca	3 a 6	10-4 a 1	0,122 a 0,173	0,01 a 1
Areia úmida	10 a 30	0,1 a 10	0,055 a 0,095	0,05 a 5
Argila seca	2 a 20	1 a 100	0,067 a 0,212	10 a 50
Argila úmida	15 a 40	100 a 1000	0,047 a 0,077	20 a 100
Granito seco	5 a 8	10-3 a 10-5	0,106 a 0,134	0,5 a 3
Granito úmido	5 a 15	1 a 10	0,077 a 0,134	2 a 5
Concreto seco	4 a 10	1 a 10	0,095 a 0,150	2 a 12
Concreto úmido	10 a 20	10 a 100	0,067 a 0,095	10 a 25

Fonte: Adaptado a partir de Annan, Daniels e Cassidy [22,23,25]

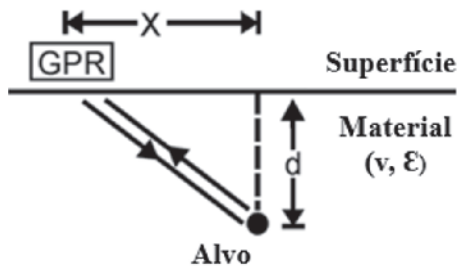


Figura 3
Relação entre posição do GPR (x), profundidade do alvo (d) durante o tempo de percurso (T)
Fonte: Adaptado a partir de Annan [22]

onde,
 v_r – velocidade relativa de propagação de pulso de onda eletromagnética em meio sólido;
 c – velocidade da onda eletromagnética no ar, igual à da luz 0,3 m/ns;
 ϵ_r – constante dielétrica relativa do material.

A presença de umidade nos materiais aumenta a constante dielétrica relativa, o que diminui a velocidade de propagação de ondas eletromagnéticas, como indicado na Tabela 1. Sais solúveis ou água salina presente nos materiais, muito comum em ambientes marinhos, aumentam a condutividade elétrica e a atenuação de onda, diminuindo a profundidade de penetração do sinal eletromagnético, com perda significativa da energia de propagação. Nesses casos a pesquisa de GPR pode ficar comprometida [22]. Segundo Alsharahi *et al.* (2016) [24], à medida que a onda se propaga num meio, o contraste da constante dielétrica entre os materiais provoca a reflexão das ondas eletromagnéticas na interface, enquanto a condutividade elétrica atenua a propagação das ondas. A energia incidente é parcialmente refletida e parcialmente transmitida, dependendo do contraste entre as constantes dielétricas relativas dos materiais adjacentes. Materiais metálicos tendem a refletir a totalidade de energia eletromagnética incidente. O tempo que o sinal leva desde sua transmissão, passando pela reflexão num alvo até sua recepção é denominado de tempo de percurso de ida e volta e depende da frequência da onda e de propriedades do meio de propagação. A Figura 3 representa a relação entre a posição das antenas de GPR e a profundidade do alvo ao longo do tempo de percurso da onda.

A Figura 4 ilustra a distribuição hiperbólica da relação entre posição espacial, velocidade da onda e tempo de percurso que, segundo Annan (2003) [22], é dada pela Equação 2, Equação 3 e Equação 4.

$$T = \frac{2\sqrt{x^2 + d^2}}{v} \tag{2}$$

$$T = \sqrt{\frac{4x^2}{v^2} + T_0^2} \tag{3}$$

$$T_0 = \frac{2d}{v} \tag{4}$$

onde,
 T – tempo de percurso de ida e volta da onda;

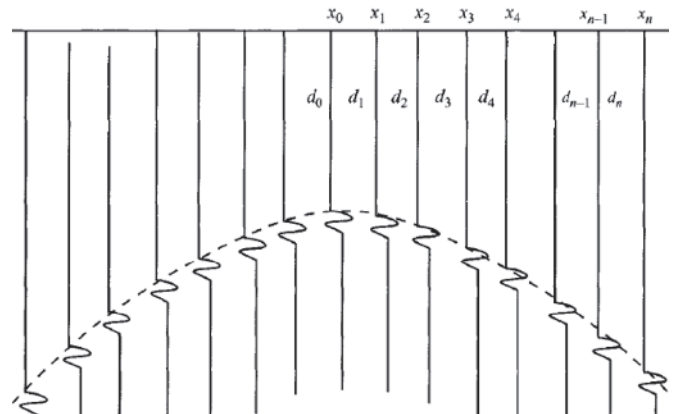


Figura 4
Função de distribuição hiperbólica
Fonte: Daniels [25]

x – projeção da posição do GPR em relação ao alvo;
 d – profundidade do alvo de reflexão;
 v – velocidade de propagação da onda eletromagnética no material;
 T_0 – tempo de percurso quando o GPR está diretamente sobre o alvo.

2.2 Instrumentação

Um sistema de GPR típico consiste nos componentes e modo de operação [17], ilustrados na Figura 5:

- a) unidade de controle, que é um dispositivo eletrônico composto por um processador e memória para armazenamento de configurações, responsável por gerar milhares de pulsos elétricos

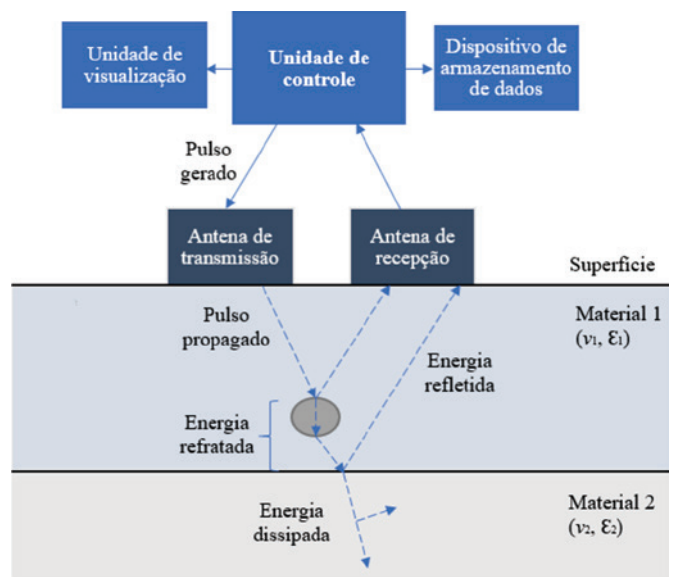


Figura 5
Componentes e modo de operação de um sistema típico de GPR
Fonte: Adaptado a partir de Fernandes [17]

Tabela 2

Profundidade de penetração, resolução e aplicação típica da frequência central usual

Frequência (f) MHz	Comprimento de onda (λ) cm	Profundidade de penetração m	Resolução vertical m	Aplicação típica
10	3000	50	7,500	Geotecnia e geologia
25	1200	30	3,000	
50	600	10	1,500	
100	300	5 a 20	0,750	Geotecnia, ambiental e mineração
250	120	2 a 7	0,300	Geotecnia, ambiental e estruturas
500	60	1 a 4	0,150	Estruturas
1000	30	0,5 a 1,5	0,075	
1500	20	0,5	0,050	
2000	15	0,4	0,035	
2700	11	< 0,4	0,025	

Fonte: Adaptado a partir de Annan e Fernandes [17,22]

- por unidade de tempo e enviá-los à antena transmissora, além de receber os dados do ensaio para processamento;
- antenas de radar, que são constituídas por transdutores, cuja função na antena de transmissão é converter corrente elétrica em pulsos eletromagnéticos a serem irradiados de maneira controlada na superfície investigada, e o inverso ocorre na antena de recepção, a qual capta os pulsos eletromagnéticos refletidos que são convertidos em corrente elétrica;
 - unidade de visualização, composto por uma tela para visualizar a representação gráfica dos dados de tempo e distância registrados no ensaio;
 - dispositivo de armazenamento de dados.

Há diferentes modos de operação das antenas de GPR, sendo que as antenas podem ser mantidas fixas ou se movimentar em relação ao alvo. No modo adotado na presente pesquisa e o mais comum segundo Annan (2003) [22], denominado *common-offset*, as antenas se movimentam ao longo da superfície, porém a distância entre as antenas de transmissão e de recepção é constante e conhecida, sendo as antenas acopladas a uma caixa plástica de proteção provida de odômetro, denominada unidade móvel.

A onda é transmitida, recebida e gravada cada vez que a unidade móvel das antenas é movida, num registro denominado "traço". O espaçamento entre traços deve ser adotado em função do tamanho do alvo a ser estudado e dos objetivos da pesquisa. Um traço unidimensional não oferece muitas informações, porém vários traços exibidos lado a lado formam um registro bidimensional de tempo-distância de GPR ou seção transversal de GPR ou radargrama, que mostra a variação das reflexões em relação à superfície. Os traços também podem ser organizados de maneira que representem blocos tridimensionais do elemento estudado [25].

2.3 Resolução

Segundo Daniels (2004) [25], o sinal emitido pela antena de transmissão é um espectro de frequências, em que o pico corresponde à frequência central da antena (f). Tal frequência pode variar entre 10 MHz e 2700 MHz e a escolha da frequência de trabalho

adequada depende de tipo de aplicação, material, profundidade e dimensões possíveis dos alvos a serem estudados. Existem três aspectos fundamentais no processo de decisão: a resolução vertical, que corresponde à capacidade de distinguir dois pontos próximos na vertical; a resolução espacial, referente à capacidade de distinguir dois pontos à mesma profundidade; e a profundidade mínima, a partir da qual é possível detectar objetos sem a obstrução do sinal da reflexão da onda direta [6]. A Tabela 2 representa a profundidade de penetração, a resolução esperada e aplicações típicas para a frequência central de antenas de radar em condições favoráveis. As menores frequências são aplicadas na área de geotecnia (≤250 MHz) e as frequências mais altas, na área de estruturas (250 a 2700 MHz) [17,22].

A resolução das informações ou precisão dos resultados do levantamento de GPR melhora com o aumento da capacidade de frequência da antena, porém é prejudicada pela diminuição da velocidade de propagação do sinal, diminuição de comprimento de onda e diminuição do pico de frequência por influência das propriedades dielétricas de materiais sólidos. Geralmente, a resolução é suficiente se as dimensões de um objeto forem maiores do que ¼ do comprimento de onda (λ) da radiação incidente, caso não ocorra interferência da não linearidade do material na propagação de ondas. Para que elementos ocultos sejam detectados adequadamente, Annan (2009) [26] sugere que a distância horizontal (Δ_x) e a vertical (Δ_t) entre os pontos consecutivos de amostragem sejam definidos pela Equação 5 e Equação 6.

$$\Delta_x \leq \frac{v}{6f_c} \quad (5)$$

$$\Delta_t \leq \frac{1}{6f_c} \quad (6)$$

onde,

Δ_x – intervalo no espaço entre pontos consecutivos de amostragem;

Δ_t – intervalo de tempo entre pontos consecutivos de amostragem;

v – velocidade da onda eletromagnética no meio;

f_c – frequência central de antenas.

Perdas de energia de radiação relacionadas ao equipamento de GPR podem afetar o sinal eletromagnético. Segundo Daniels (2004) [25] e Fernandes (2006) [17], essas perdas podem ocorrer devido a:

- ineficiência das antenas para transmitir e receber a totalidade do sinal;
- instabilidade que ocorre no acoplamento das antenas em superfícies irregulares, o que interfere no padrão de radiação da antena por ser um feixe direcional;
- espalhamento geométrico do feixe de energia ao longo da profundidade;
- dispersão do sinal eletromagnético a partir da incidência no próprio alvo;
- atenuações do sinal devido às propriedades dielétricas dos meios de propagação.

Antes do ensaio é necessário limitar o tempo de trânsito de ida e volta do sinal (T) de acordo com a estimativa da profundidade de características e alvos presentes para evitar o armazenamento de dados desnecessários fora do tempo esperado e acelerar as medições de campo.

2.4 Análise dos dados e interpretação

Transformar dados de GPR em informações específicas e aplicáveis pode seguir dois caminhos, segundo Annan (2009) [26]. O primeiro e mais comum considera as medições dos traços em forma de seção plana ou de volume para indicar a posição espacial do alvo. O segundo determina variáveis quantitativas a partir das propriedades da onda como velocidade, atenuação, impedância e as converte em quantidades específicas e aplicáveis a propriedades de material, que é a tendência para a evolução do uso do GPR.

Se as propriedades dielétricas dos materiais tiverem contraste adequado (Figura 6a), a seção de GPR pode ser considerada uma representação bidimensional do elemento estudado e pode ser inter-

pretada para definir características internas do elemento. A Figura 6b representa uma seção de GPR típica em que o eixo horizontal é a distância percorrida ao longo da superfície do elemento em estudo e o eixo vertical é o tempo de percurso de ida e volta da onda à superfície, que pode ser convertido em profundidade, se a velocidade da onda ou constante dielétrica do material forem conhecidas.

A Figura 6b representa o padrão de algumas das características observadas por Fernandes (2006) [17] em seções de GPR de alvenarias históricas. Reflexões isoladas, em formato de hipérbole, indicam a presença de elementos individuais e de pequenas dimensões embutidos (alvos) como metal, madeira ou outro material com propriedade dielétrica de contraste com a alvenaria. A profundidade do alvo pode ser determinada considerando o vértice da hipérbole. A presença de área significativa com grande quantidade de reflexões indica a presença de material deteriorado ou heterogêneo, como fissuras, vazios, destacamentos. Longos sinais de reflexão paralelos à superfície de aquisição de dados correspondem à interface entre camadas de materiais diferentes, desprendimentos ou rachaduras em alvenaria.

Como uma estimativa da velocidade de propagação da onda no material, Annan (2003) [22] e Cassidy (2009) [23] sugerem ajustar uma forma hiperbólica com parâmetros conhecidos que coincida com uma hipérbole de reflexão na seção de GPR, conforme representado na Figura 6b. A partir da combinação da velocidade (v) e do tempo de propagação (T₀) é possível estimar também a profundidade (d) do alvo.

A polaridade do sinal de GPR pode ser útil na interpretação dos dados. Annan (2003) [22] sugere que um pulso de onda positivo tem o formato da letra "M" e o pulso negativo tem o formato da letra "W". A Figura 7 descreve os elementos básicos de uma medição de GPR como os sinais que percorrem diretamente o ar (onda direta A) e alcançam primeiro a antena de recepção com polaridade positiva (M). Em seguida, há sinais que percorrem diretamente o material próximo à superfície (onda direta G), com polaridade

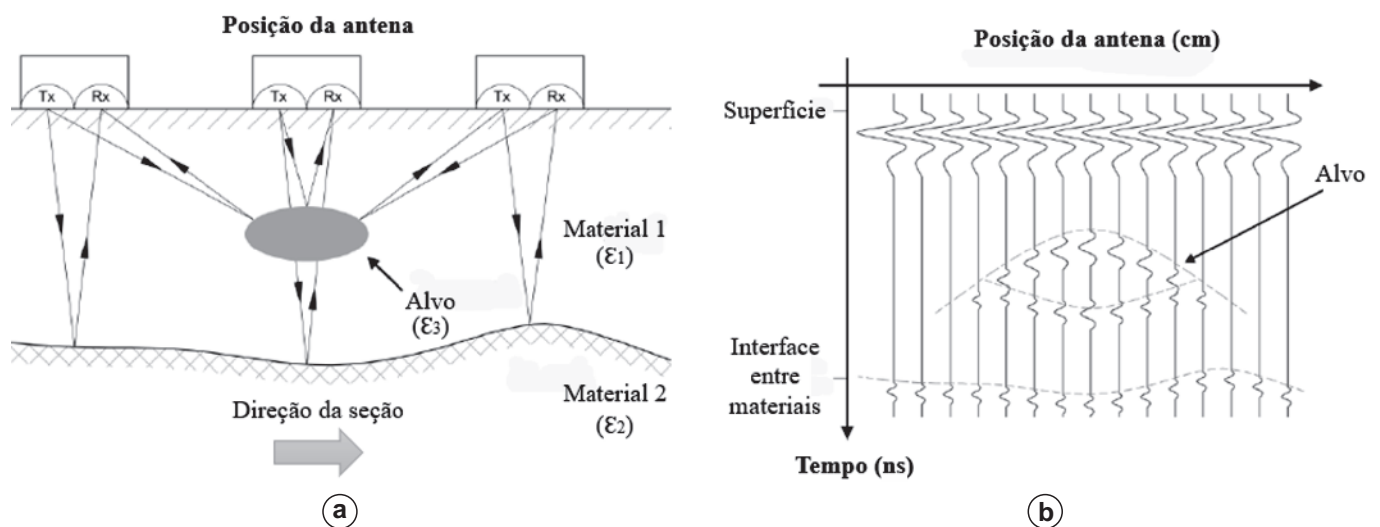


Figura 6

Reflexão de ondas sobre um alvo (a) metodologia e (b) radargrama resultante

Fonte: Adaptado a partir de Fernandes [17]

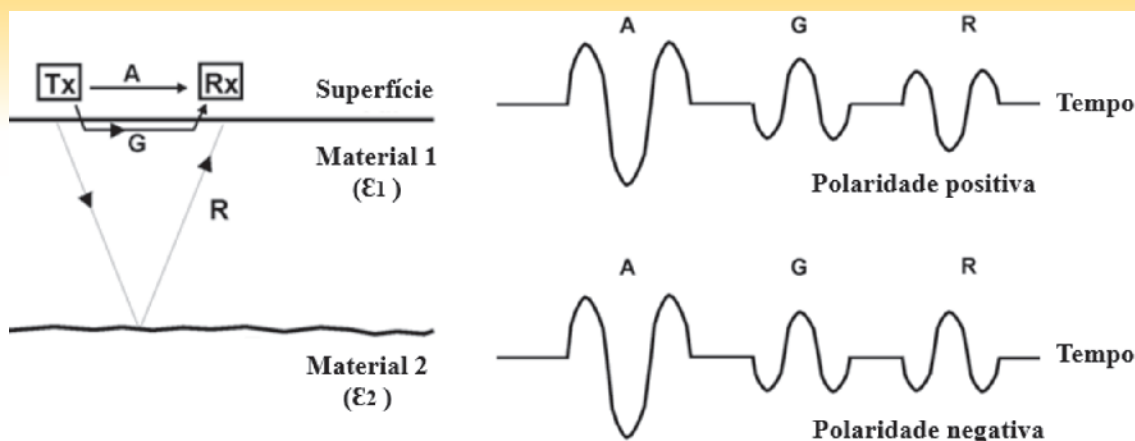


Figura 7

Polaridade de pulsos de onda

Fonte: Adaptado a partir de Annan [22]

negativa (W). Enfim, os sinais que são refletidos na interface de um alvo no interior do elemento (reflexão de onda R) e levam mais tempo até chegarem na antena de recepção, podem ter polaridade positiva ou negativa (M ou W).

A reflexão de uma onda é provocada pela mudança da impedância eletromagnética na interface dos materiais. Um alvo com impedância maior do que o meio produz uma reflexão de pulso positivo, enquanto um alvo de impedância menor, produz uma reflexão de pulso negativo. Geralmente rochas e vazios representam materiais de alta impedância e geram reflexões positivas em GPR. Enquanto o metal é um material de impedância muito baixa e sempre dará origem à onda de reflexão negativa [22].

Exibir os dados de maneira adequada é fundamental para analisá-los. A escolha dos parâmetros de exibição é parte integrante da interpretação da seção de GPR. Muitas vezes não é prático exibir os dados na forma de traços. O modo mais comum de representação bidimensional de dados é a imagem de scanner, denominada radargrama. Esse consiste na atribuição de cores (ou variação de intensidade de uma única cor) para indicar a variação de amplitude nos traços [22].

Durante o ensaio de GPR podem ser coletados dados com a incorporação indesejada de informações que não interessam aos objetivos da investigação, causando efeitos de sobreposição de

dados que prejudicam os sinais desejados dos alvos. Tais ruídos podem vir de fontes como: veículos, cabos elétricos, metais, sistemas de telecomunicações, telefones celulares, tubulações e fenômenos elétricos e magnéticos naturais [25].

O processamento básico da seção de GPR consiste na aplicação de filtros e de ganhos, tais como: filtros *band pass*, *DC removal*, controle de ganho automático (AGC), entre outros disponíveis em softwares de processamento. A relação entre sinal e ruído pode ser melhorada com a aplicação de filtros que delimitam a visualização de uma banda de frequência adequada para a antena utilizada. A aplicação de ganhos permite equalizar as amplitudes de cada traço, a fim de compensar a atenuação do sinal devido à propagação ao longo da profundidade em materiais sólidos [26].

3. Aquisição de dados no Theatro Municipal do Rio de Janeiro

3.1 Descrição das cúpulas e abóbada

No pavimento superior do Theatro Municipal, próximo ao centro da fachada principal, denominada área nobre, conforme representa a Figura 8, existe o *foyer*, um salão bem decorado para recepção do

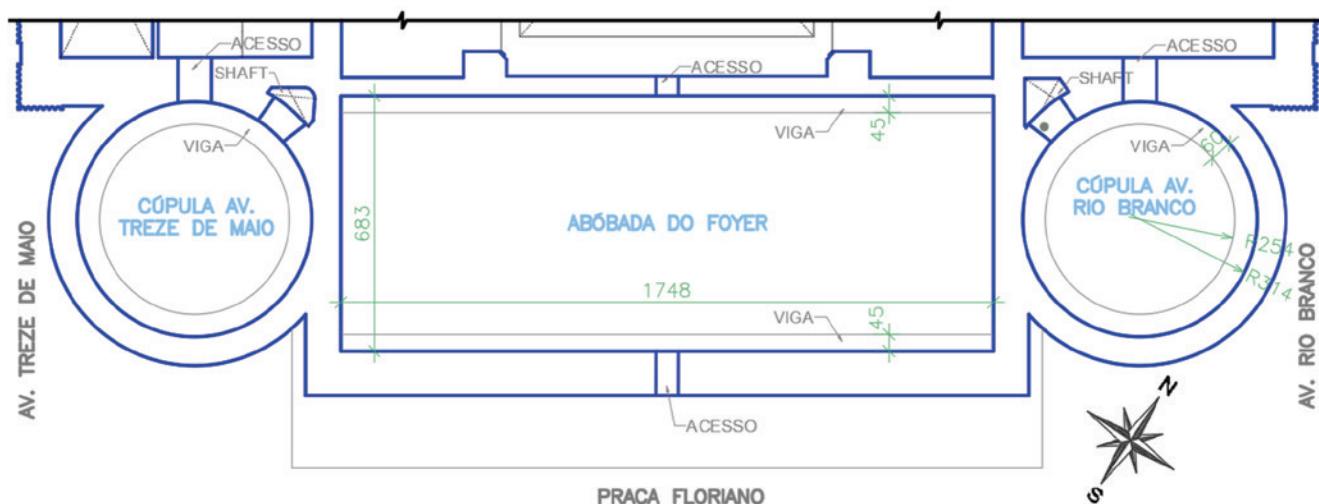


Figura 8

Planta do extradorso das cúpulas e abóbadas

público e coberto por uma abóbada de berço com dimensões em planta do extradorso de 6,83 m x 17,48 m e flecha de 2,60 m, construída em alvenaria de dupla camada de tijolos cerâmicos assentados com argamassa de cimento e cal. As duas rotundas laterais têm teto em cúpula esférica, com diâmetro de 6,28 m no extradorso, flecha de 2,75 m e foram construídas em alvenaria de tijolos maciços cerâmicos assentados e revestidos com argamassa de cimento e cal.

As cúpulas e a abóbada foram construídas em 1907, apoiadas em todo perímetro sobre paredes e pilares. O tempo, os eventos festivos, vandalismo, infiltrações no telhado, as obras no entorno, como a construção do metrô nas proximidades, entre outras ocorrências, danificaram o edifício. Em 1976 foram reforçadas com concreto armado e desde então as cascas passaram a ser em alvenaria armada. Schiros relata que toda a intervenção foi executada em três dias, sem pisar sobre as cascas, sem escoramento para não danificar as pinturas no intradorso e consistiu nas seguintes etapas [27]:

- Etapa 1 – construção de vigas laterais e uma casca sobreposta em concreto projetado armado, a fim de suportar parte do peso da casca original, conforme Figura 9a. Na concretagem, deu-se prioridade à criação de arcos sobre as maiores fissuras transversais (Figura 9b);
- Etapa 2 – injeção de epóxi nas fissuras para restabelecer o monolitismo das cascas, por meio de purgadores plásticos, conforme Figura 9b;

- Etapa 3 – ancoragem de insertos metálicos imersos em furos preenchidos com epóxi, a fim de promover a aderência entre a casca original em alvenaria e a nova em concreto, conforme Figura 9c e Figura 9d.

São objetos de estudo a abóbada do foyer e a cúpula da Av. Rio Branco, sendo que esta encontra-se coberta por uma manta de impermeabilização que, embora deteriorada e desprendendo da casca em alguns trechos, não pode ser removida, tendo sido os ensaios realizados sobre a manta. A cúpula da Av. Treze de Maio não foi estudada devido à impossibilidade de acesso, por isso suas características são consideradas similares às da Av. Rio Branco.

3.2 Metodologia

Todo levantamento de dados com GPR foi realizado no extradorso das cascas, após limpeza superficial e marcação da malha de eixos com giz branco, evitando-se pisar nas cascas. Utilizou-se o sistema da MALA GeoScience, constituído por antenas de frequência de 1,2 GHz, acopladas a uma unidade móvel sobre rodas. A aquisição dos dados de deslocamento das antenas foi feita por meio de odômetro conectado à roda traseira esquerda da unidade móvel.

Testes preliminares permitiram verificar o padrão de visualização de insertos metálicos, a velocidade adequada de movimentação e o acoplamento da unidade móvel das antenas sobre a superfície das cascas. Também foi feita a calibração do

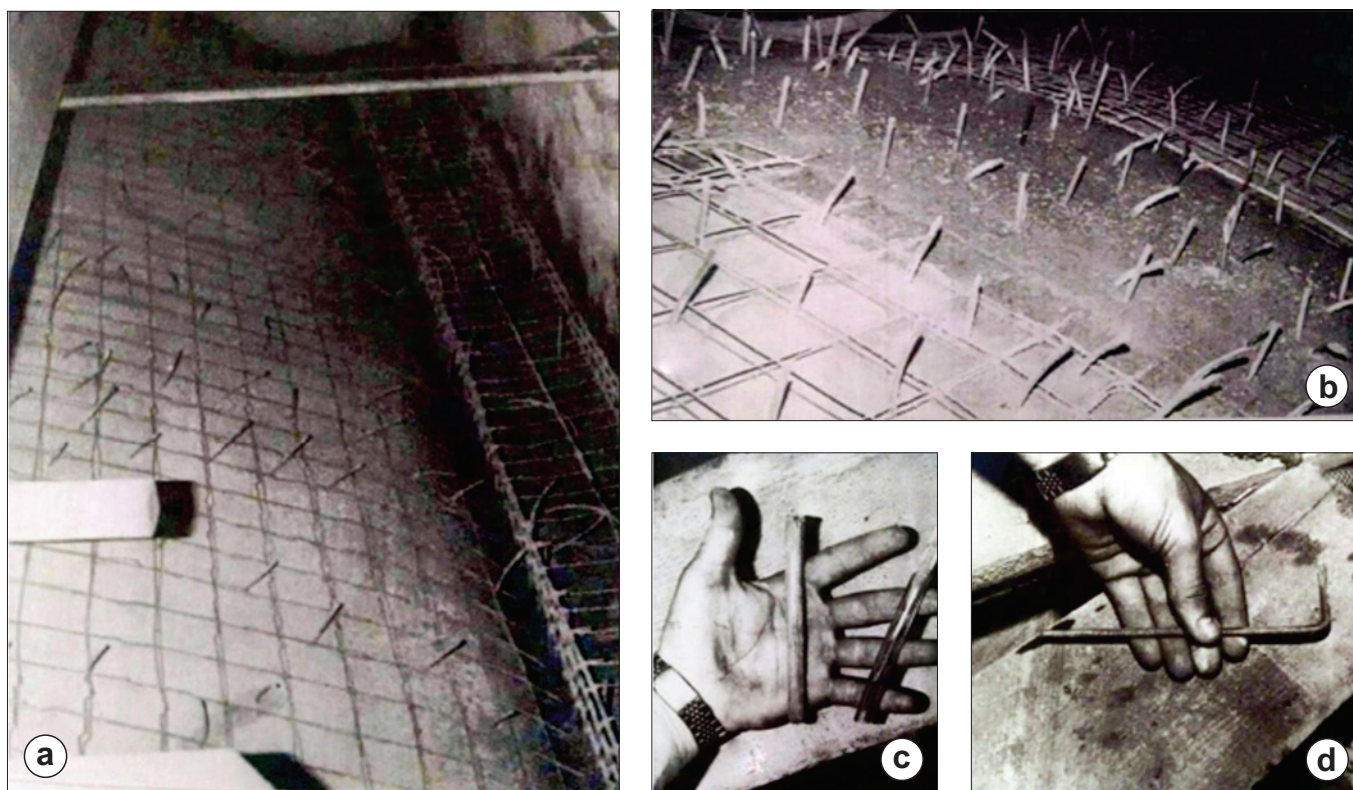


Figura 9

Fotos do reforço das cascas na década de 1970

Fonte: Schiros [27]

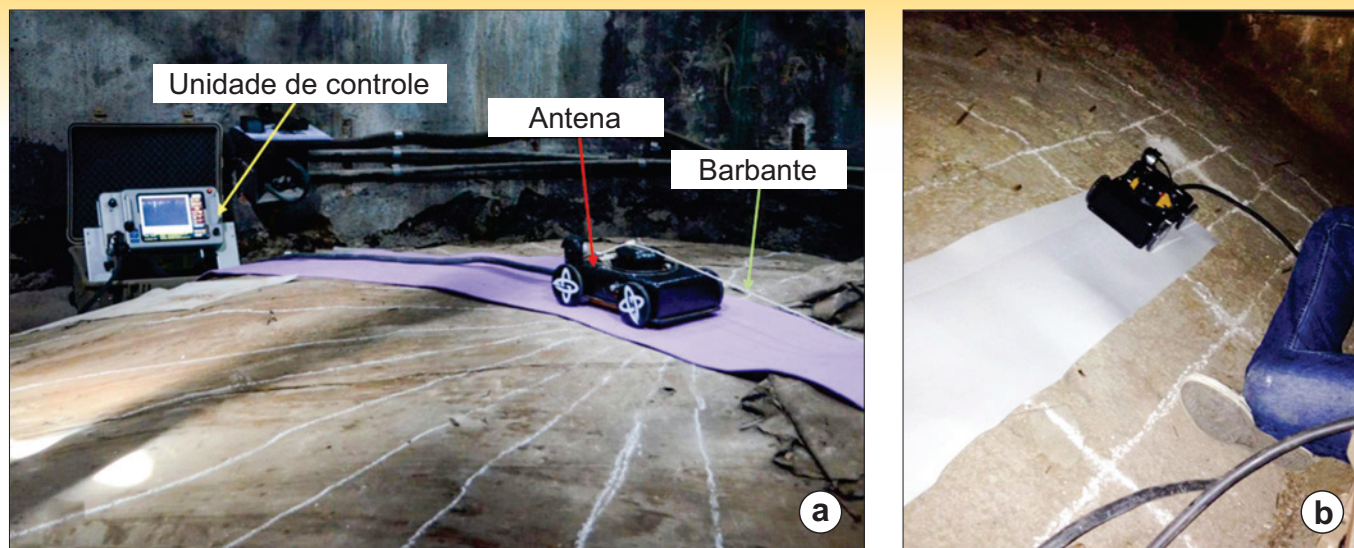


Figura 10
Ensaio de GPR: (a) cúpula da Av. Rio Branco e (b) abóbada

odômetro da unidade móvel, a partir da comparação de medições de comprimento por trena graduada de 5 m, com precisão de 0,01 m. Foi observado que o contato direto entre as rodas da unidade móvel e a superfície das cascas ao longo do percurso do levantamento foi prejudicado pela rugosidade do concreto projetado e saliências de injeção de argamassa no caso da abóbada, com o agravante da sobreposição da manta de impermeabilização no caso da cúpula. Assim, uma faixa de espuma sintética de etileno acetato de vinila (EVA) de espessura de 3 mm foi utilizada para facilitar o movimento das rodas da

unidade móvel das antenas sobre as cascas como ilustrado na Figura 10a e na Figura 10b.

Para a regularidade da aquisição de dados nas seções de GPR, manteve-se a velocidade o mais constante possível na movimentação da unidade móvel das antenas, a qual foi conduzida manualmente no percurso horizontal. Na direção vertical, a unidade de aquisição foi conduzida manualmente, a partir da base da casca até onde foi possível o alcance das mãos. A partir daí o veículo foi conduzido com a ajuda de um barbante até atingir o vértice, seguindo as linhas de eixo marcadas, evitando-se pisar na cúpula e abóbada. A aquisição de dados foi realizada em 24 seções da cúpula da Av. Rio Branco, 12 seções da abóbada do foyer e duas seções em paredes laterais em alvenaria. Também foram realizados levantamentos em 3D em cada um dos elementos estudados, porém os radargramas não foram considerados satisfatórios para análise devido à alta reflexão da malha metálica e consequente atenuação do sinal em toda área abaixo da malha como indicado na Figura 11.

As espessuras obtidas pelo ensaio de GPR foram utilizadas em etapa subsequente da pesquisa para o desenvolvimento do modelo numérico para análise não linear da estrutura pelo método dos elementos finitos, a fim de investigar a vulnerabilidade dos elementos estruturais, as causas dos danos na década de 1970 e a eficiência das medidas de intervenção já realizadas.

3.3 Resultados

Utilizou-se o software Reflex2DQuick, versão 3.0, para o processamento dos radargramas bidimensionais e o software Reflex3DScan para o processamento das aquisições tridimensionais. No processamento dos radargramas bidimensionais aplicou-se o filtro *Dewow*, necessário para os dados do sistema MALA, e função de ganho para compensar a atenuação do sinal ao longo da profundidade [28]. Já nas aquisições tridimensionais aplicou-se também o filtro *Dewow*, bem como o *Background Removal* para eliminar a interferência da onda direta.

O procedimento padrão para calibração da velocidade de propagação de ondas eletromagnéticas num material é feito pela medição do tempo de percurso de ida e volta na seção, posicionando uma chapa metálica na superfície oposta do elemento. Porém, devido às dificuldades de acesso à superfície oposta da cúpula e da abóbada, tal procedimento tornou-se impraticável no presente

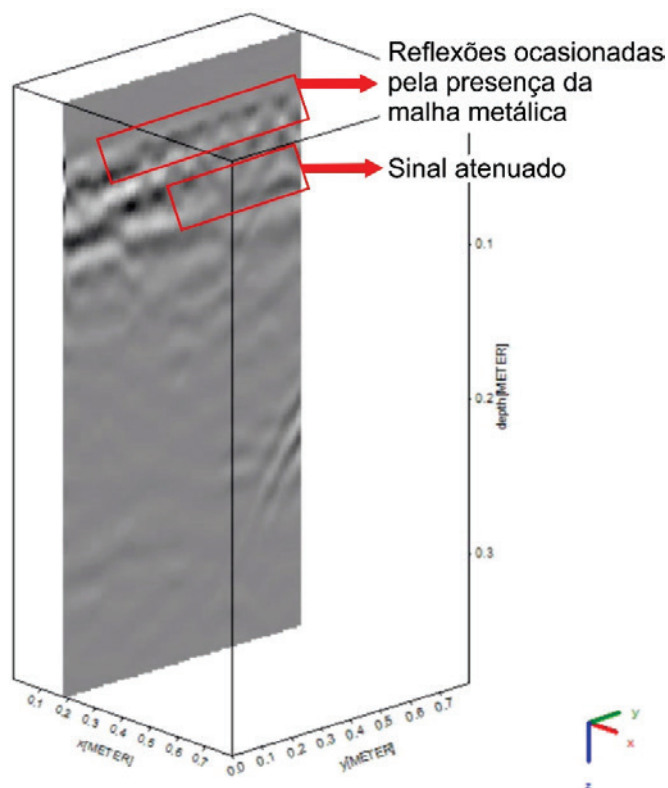


Figura 11
Investigação tridimensional com resultado não satisfatório

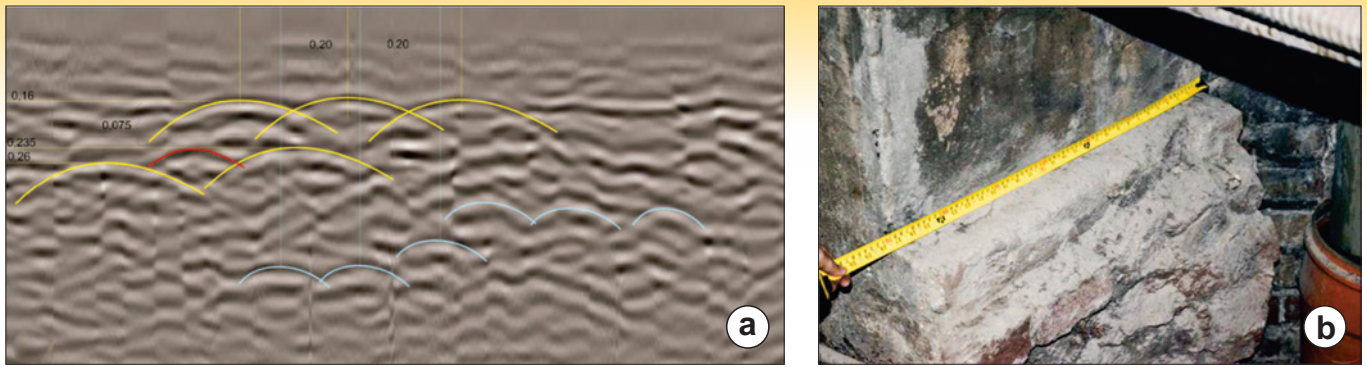


Figura 12
Parede lateral da cúpula (a) radargrama (b) determinação da espessura

estudo. Como se trata de elementos compostos por diversos materiais, adotou-se a velocidade da alvenaria como padrão para a seção, por ser o material predominante na constituição das cascas. A velocidade da onda na alvenaria foi estimada em 0,15 m/ns, a partir do tempo de ida e volta registrado no radargrama da parede lateral da cúpula da Av. Rio Branco (Figura 12a), trecho próximo a um shaft, em que a alvenaria de tijolos se encontrava exposta e foi possível medir sua espessura (Figura 12b). A velocidade adotada é compatível com as determinadas por Fernandes (2006) [17] em alvenarias de tijolo cerâmico de construções históricas.

O sinal eletromagnético perdeu energia ao incidir nas barras da tela metálica, gerando dispersão significativa ao longo da seção das cascas, o que prejudicou a determinação da sua espessura total e de suas camadas constituintes na maior parte dos radargramas. Apenas nos trechos em que a taxa de armadura era menor ou em que a armadura se apresentou transversal ao percurso das antenas o sinal foi propagado suficientemente ao longo da seção, sendo possível estimar a espessura da cúpula e da abóbada, estimar suas camadas, assim como a dimensão das unidades da alvenaria.

A Figura 13a representa as características construtivas da cúpula da Av. Rio Branco e a Figura 13b, seu radargrama típico, em que se detecta uma espessura total da casca entre 22 e 25 cm no vértice. A espessura tende a crescer linearmente em direção à base, que aparenta ser cerca de 2 a 5 cm maior. Em diversos radargramas observou-se um padrão de pequenas parábolas con-

secutivas com espaçamento entre 8 a 10 cm no alinhamento do intradorso, indicando ser a junta vertical entre tijolos, cujas dimensões são compatíveis com as encontradas em termogramas e em tijolos aparentes na parede adjacente. As barras da tela metálica apresentam espaçamento de 10 cm, informação confirmada em ensaio de pacometria e descrito no relatório de Schiros [27]. Não foi identificada camada intermediária, o que confirma a existência de apenas uma camada de tijolo.

A Figura 14a representa as características construtivas da abóbada do foyer e a Figura 14b, seu radargrama típico, em que se detecta uma espessura total da casca entre 20 e 23 cm no vértice. A espessura tende a crescer linearmente em direção à base, que aparenta ser cerca de 5 a 8 cm maior. Em alguns radargramas observou-se um padrão de pequenas parábolas consecutivas com espaçamento entre 16 a 20 cm no alinhamento do intradorso, indicando os tijolos, cujas dimensões são compatíveis com as encontradas em termogramas. As barras da tela metálica apresentam espaçamento entre 10 e 11 cm, informação confirmada em ensaio de pacometria e descrito no relatório de Schiros [27], assim como a presença de pinos metálicos, com espaçamento típico de 20 cm. Foi identificada camada intermediária, confirmando duas camadas de tijolos descrita por Schiros [27], possivelmente com espessura entre 10 a 12 cm.

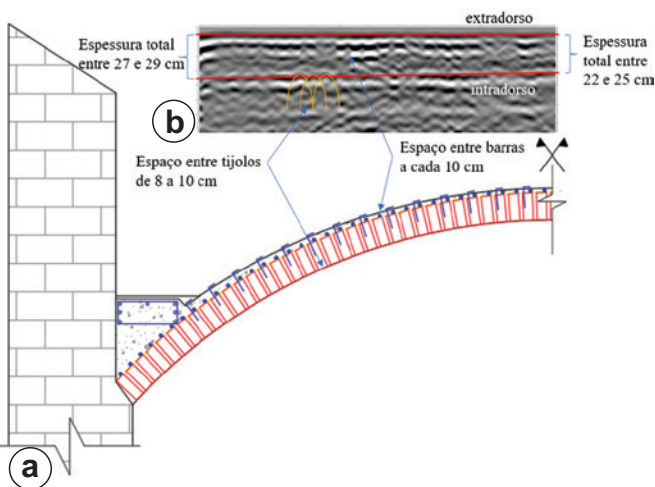


Figura 13
Seção transversal da cúpula da Av. Rio Branco - (a) detalhe construtivo e (b) radargrama

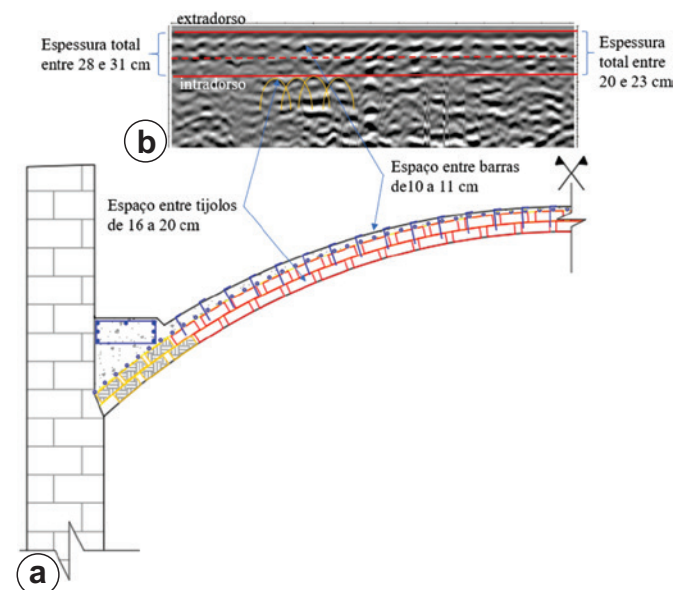


Figura 14
Seção transversal da abóbada - (a) detalhe construtivo e (b) radargrama

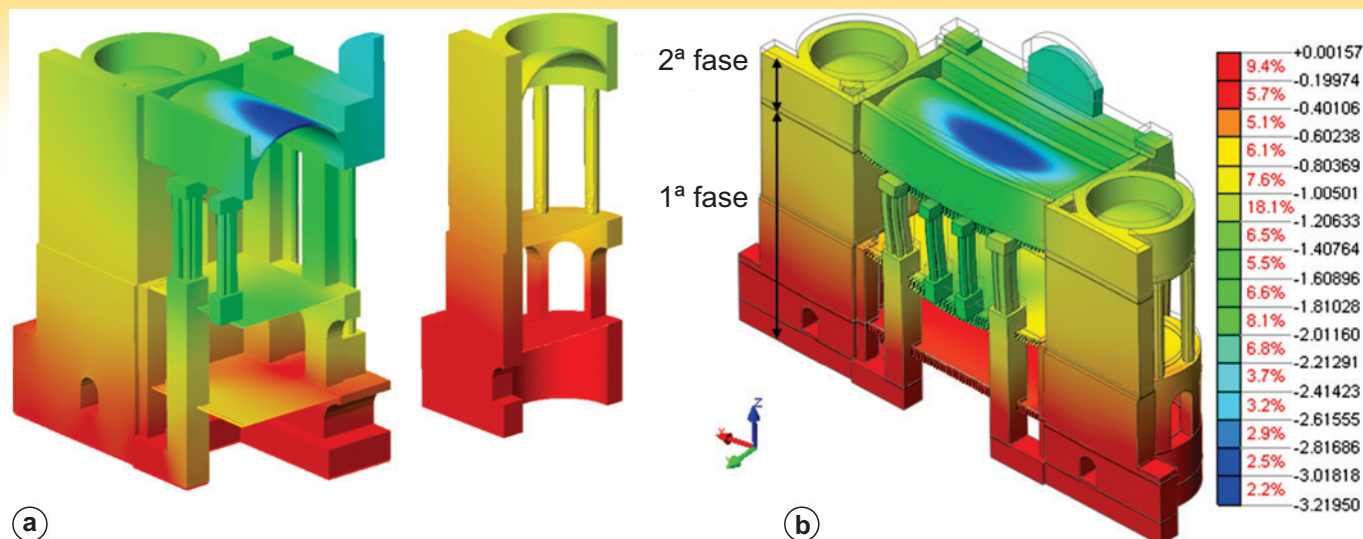


Figura 15

Modelo numérico - (a) detalhe da espessura das cascas; (b) deslocamentos verticais (mm) da análise não linear física considerando duas fases construtivas

Por se tratar de elementos compostos por diversos materiais, não foi possível detectar danos como vazios e fissuras nas cascas investigadas pelo GPR com antenas de 1,2 GHz. Para tal finalidade, sugere-se o uso de antenas de maior frequência, cuja resolução é mais adequada.

A partir das informações das espessuras das cascas avaliadas pelo ensaio de GPR e de dados obtidos por outros ensaios, o modelo numérico da estrutura foi elaborado no *software FX+ for Diana* e as análises não lineares pelo método dos elementos finitos foram realizadas no *software Diana* versão 10.2 (Figura 15), cujos resultados extrapolam os objetivos do presente trabalho.

4. Conclusões

A técnica de GPR com antena de 1.2 GHz de frequência foi aplicada na cúpula e na abóbada em alvenaria reforçada do Theatro Municipal do Rio de Janeiro, atendendo ao objetivo de estimar a espessura total dos elementos e de suas camadas, confirmar características construtivas, aferir as dimensões dos tijolos com dados de outros ensaios e identificar elementos embutidos. Como se trata de elementos estruturais compostos por diversos materiais, adotou-se a velocidade da alvenaria como padrão para a seção, por ser o material predominante na constituição da cúpula e da abóbada. A velocidade da onda na alvenaria foi estimada em 0,15 m/ns, a partir do tempo de ida e volta registrado no radargrama da parede lateral da cúpula da Av. Rio Branco, elemento composto apenas por alvenaria de tijolos, em que foi possível acesso para determinar sua espessura.

A cúpula apresentou espessura variável entre 22 e 29 cm, constituída por uma camada de tijolo. A abóbada apresentou espessura variável entre 20 e 31 cm, constituída por duas camadas de tijolos. Tais informações serviram de referência para o desenvolvimento de modelo numérico utilizado para análises não lineares da estrutura pelo método dos elementos finitos, cujos resultados extrapolam os objetivos do presente trabalho.

Não foi possível detectar danos como vazios e fissuras. Para tal finalidade, sugere-se o uso de antenas com maior frequência, cuja resolução seja mais adequada às dimensões do elemento.

O sinal eletromagnético perdeu energia ao incidir nas barras da tela metálica, gerando dispersão significativa ao longo da seção das cascas, o que prejudicou a determinação da sua espessura

total e de suas camadas constituintes na maior parte dos radargramas, especialmente nos levantamentos em 3D. Apenas nos trechos em que a armadura se apresentou transversal ao percurso das antenas o sinal foi propagado ao longo da seção, permitindo estimar as informações desejadas.

O levantamento de GPR em estruturas antigas ainda é pouco usual, provavelmente pela dificuldade na interpretação das imagens geradas pela investigação de elementos complexos, o que demanda tempo e dedicação para adquirir conhecimentos e prática para usar adequadamente a técnica. É imprescindível um estudo prévio para o conhecimento do processo construtivo e das eventuais intervenções sofridas pelo elemento estudado, a fim de que se tenha uma previsão do tipo de elementos esperados na visualização dos radargramas, assim como a aferição de informações coletadas por outros ensaios complementares, documentos ou outros meios.

O presente estudo busca contribuir com informações para o aprimoramento da metodologia do ensaio de GPR e dados experimentais para trabalhos de preservação estrutural em construções semelhantes, especialmente abóbadas e cúpulas em alvenaria.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação do Theatro Municipal do Estado do Rio de Janeiro, em especial ao Setor de Engenharia e Arquitetura, pelo apoio à pesquisa. Também à Escola de Engenharia da Universidade do Minho. O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) – “Taxas” e bolsa sanduíche da Faperj, processo número E-26/201.812/2017.

6. Referências bibliográficas

- [1] ICOMOS. “Recommendations for the analysis, conservation and structural restoration of architectural heritage”. International Scientific Committee for Analysis and Restoration of Structures of Architectural Heritage. Paris, 2003.
- [2] BALAYSSAC, J. P. et al. “Description of the general outlines of the French project SENSO – Quality assessment and limits of different NDT methods”. *Construction and Building Materials*, v. 35, n. October 2012, p. 131–138.

- [3] MILOVANOVIĆ, B.; BANJAD PEČUR, I. "Review of Active IR Thermography for Detection and Characterization of Defects in Reinforced Concrete". *Journal of Imaging*, v. 2, n. 2, p. 11, 2016.
- [4] BENEDETTO, A.; BENEDETTO, F. "Application field-specific synthesizing of sensing technology – civil engineering application of ground-penetrating radar sensing technology". *Reference Module in Material Science and Materials Engineering*. *Comprehensive Materials Processing*, v. 13, p. 393–425, 2014.
- [5] MANHÃES, P. M. B.; ARARUNA JÚNIOR, J. T.; PIRES, P. J. "Uso do GPR na identificação de elementos de fundação de edificações existentes", in: XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Eng. Geotécnica. Belo Horizonte, Brasil, 2016.
- [6] FERNANDES, F. M. C. P.; LOURENÇO, P. B.; CRUZ, P. J. S. "Possibilidades do radar de prospecção geotécnica em estruturas e aplicações em Portugal". *Engenium*, 2010. p. 84–90.
- [7] LAU, C.L.; SCULLION, T.; CHAN, P. "Modeling of Ground-Penetrating Radar wave propagation in pavement systems", in: *Transportation Research Record*, Transportation Research Board. Texas, 1992. p. 99–107.
- [8] LI, M.; ANDERSON, N.; SNEED, L.; TORGASHOV, E. "Condition assessment of concrete pavements using both ground penetrating radar and stress-wave based techniques", *Journal of Applied Geophysics*. 135 (2016)p. 297–308.
- [9] BENEDETTO, A.; TOSTI, F.; CIAMPOLI, L. B.; D'AMICO, F. "An overview of ground-penetrating radar signal processing techniques for road inspections", *Signal Processing*. 132 (2017) p. 201–209.
- [10] DINH, K.; GUCUNSKI, N.; KIM, J.; DUONG, T. H. "Understanding depth-amplitude effects in assessment of GPR data from concrete bridge decks", *NDT and E International*. 83 (2016) p. 48–58.
- [11] DINH, K.; GUCUNSKI, N.; DUONG, T. H. "Migration-based automated rebar picking for condition assessment of concrete bridge decks with ground-penetrating radar", *NDT and E International*. 98 (2018) p. 45–54.
- [12] ALANI, A. M.; ABOUTALEBI, M.; KILIC, G. "Applications of ground penetrating radar (GPR) in bridge deck monitoring and assessment", *Journal of Applied Geophysics*. 97 (2013) p. 45–54.
- [13] DINH, K.; GUCUNSKI, N.; ZAYED, T. "Automated visualization of concrete bridge deck condition from GPR data", *NDT and E International*. 102 (2019) p. 120–128.
- [14] BENEDETTO, A. "A three-dimensional approach for tracking cracks in bridges using GPR", *Journal Applied Geophysics*. 97 (2013) p. 37–44.
- [15] ÁLVAREZ DE LARA, R. R. "Structural analysis of the church of the Monastery of São Miguel de Refojos". 2016. 147 f. Dissertation (Advanced Masters in Structural Analysis of Monuments and Historical Constructions). University of Minho. Guimarães, 2016.
- [16] BINDA, L.; SAISI, A.; TIRABOSCHI, C. "Investigation procedures for the diagnosis of historic masonries". *Construction and Building Materials*, v. 14, n. 4, p. 199–233, 2000.
- [17] FERNANDES, F. M. C. P. "Evaluation of two novel NDT techniques – microdrilling of clay bricks and ground-penetrating radar in masonry". Tese (doutorado). University of Minho. Guimarães, 2006.
- [18] SANTOS ASSUNÇÃO, S.; PEREZ GRACIA, V.; CASSELLES, O.; CLAPES, J.; SALINAS, V. "Assessment of complex masonry structures with GPR compared to other non-destructive testing studies". *Remote Sensing*, n. 6, p. 8220–8237, 2014.
- [19] ZHAO, W.; FORTE, E.; FONTANA, F.; PIPAN, M.; TIAN, G. "GPR imaging and characterization of ancient Roman ruins in the Aquileia Archaeological Park, NE Italy", *Measurement*. 113 (2018) p. 161–171.
- [20] IPHAN, "Lista dos bens tombados e processos em andamento (1938 - 2018)", (2018). http://portal.iphan.gov.br/uploads/ckfinder/arquivos/Lista_bens_tombados_processos_andamento_2018 (accessed on December 10, 2018).
- [21] CINTRA, D. C. B.; ROEHL, D. M.; SÁNCHEZ FILHO, E. S.; SANTOS, M. F. S. F.; FILIZOLA, G.; ASSUMPCÃO, M. S. "Structural Intervention Case in the Theatro Municipal do Rio de Janeiro", in: *3rd International Conference on Protection of Historical Constructions*. Lisbon, Portugal, 2017.
- [22] ANNAN, A. P. "Ground-penetrating radar – principles, procedures & applications". Mississauga, Canada: Sensors and Software Inc., 2003.
- [23] CASSIDY, N. J. "Electrical and magnetic properties of rocks, soils and fluids". In: *Ground penetrating radar theory and applications*. Oxford, United Kingdom: Elsevier Science, 2009. p. 46.
- [24] ALSHARAH, G.; DRIOUACHA, A.; FAIZE, A. "Performance of GPR influenced by electrical conductivity and dielectric constant". *Procedia Technology*, v. 22, p. 570–575, 2016.
- [25] DANIELS, D. J. "Ground penetrating radar". 2. ed. London: The Institution of Electrical Engineers, 2004.
- [26] ANNAN, A. P. *Electromagnetic principles of ground-penetrating radar*. In: *Ground penetrating radar theory and applications*. Oxford, United Kingdom: Elsevier Science, 2009. p. 4–40.
- [27] SCHIROS, L. M. "Recuperação estrutural das cúpulas do foyer do Theatro Municipal do Rio de Janeiro". *Colóquio sobre Patologia do Concreto e Recuperação Estrutural - Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON)*, p. 188–204, 1978.
- [28] SANDMEIER, G. R. *Reflex2D Quick*, version 3.0. Karlsruhe, Germany, 2017.
- [29] FUNDAÇÃO DO THEATRO MUNICIPAL DO RIO DE JANEIRO. "Evolução arquitetônica do Theatro Municipal". *Drawings*. Rio de Janeiro, 2009.