

## Desenvolvimento de um Método Não-Destrutivo de Controlo da Qualidade de Interfaces Betão-Betão



Paulo Santos<sup>1</sup>



Eduardo Júlio<sup>2</sup>

### RESUMO

Vigas prefabricadas com laje betonada *in situ* e tabuleiros de pontes reforçados com uma nova camada de betão são duas situações frequentes em que a resistência da interface condiciona o comportamento monolítico do elemento compósito betão-betão. Vários estudos demonstraram que a rugosidade do substrato é o parâmetro com maior influência na resistência deste tipo de ligações. Este facto é igualmente tido em conta nos actuais regulamentos de betão armado, EC 2, ACI 318, entre outros, que incorporam a designada teoria do corte-atrito.

Estudos recentes têm-se centrado na caracterização da textura de superfícies de betão, tendo sido desenvolvidas diversas metodologias não-destrutivas para obtenção *in situ* de perfis de textura, cálculo de parâmetros de ondulação e de rugosidade, e definição de correlações entre estes e a resistência ao corte e à tracção das interfaces betão-betão. Apesar dos excelentes resultados, estes estudos apresentam a limitação de a caracterização das superfícies só poder ser realizada enquanto estas estão visíveis.

Neste artigo, é apresentado um estudo numérico baseado no Método dos Elementos de Fronteira, conduzido com o objectivo de analisar a viabilidade de desenvolver uma metodologia não-destrutiva de inspecção *in situ* de interfaces betão-betão que possa ser utilizada após a aplicação da segunda camada de betão. As técnicas não destrutivas baseadas na propagação de ondas de alta frequência, e.g. os ultra-sons, apoiam-se na interpretação do campo de ondas reflectidas. Deste modo, o correcto conhecimento da forma como os diversos tipos de ondas se propagam revela-se essencial. No entanto, a propagação de ondas em meios elásticos confinados e não homogéneos é um fenómeno físico complexo, envolvendo normalmente a excitação de diversos tipos de ondas. O Método dos Elementos de Fronteira permite a modelação deste tipo de problemas e a posterior interpretação das respostas. São apresentados os resultados do estudo, assim como as conclusões mais relevantes.

### PALAVRAS-CHAVE

Método dos Elementos de Fronteira; propagação de ondas; rugosidade, interface, betão, inspecção, *in situ*, não-destrutivo.

<sup>1</sup> CICC, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Coimbra. pfsantos@dec.uc.pt

<sup>2</sup> ISISE, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Coimbra. ejulio@dec.uc.pt

## **1. INTRODUÇÃO**

### **1.1 Enquadramento**

A prefabricação de elementos estruturais em betão inclui, regra geral, a betonagem *in situ* de determinadas partes. De igual modo, a reabilitação de estruturas de betão implica, frequentemente, o seu reforço com recurso a técnicas que implicam o aumento das secções transversais dos elementos resistentes. Estas são duas situações em que a aderência do betão novo ao betão existente é essencial para assegurar o monolitismo do conjunto.

A avaliação da resistência ao corte entre camadas de betão de diferentes idades tem sido estudada por diferentes investigadores ao longo das últimas décadas. Desde a publicação da *teoria do corte-atrito* em 1966 por Birkeland e Birkeland [1], diferentes expressões de cálculo têm sido propostas, tendo sido algumas destas incorporadas em regulamentos e códigos de betão armado, como o CEB model code 78 e 90 [2], o Eurocódigo 2 [3], o ACI 318 [4], entre outros.

Comum a todas as expressões propostas, incluindo as adoptadas nos códigos e regulamentos de betão, é o facto de se considerar a rugosidade da superfície do substrato de betão como o factor que condiciona dois dos parâmetros com mais influência na resistência ao corte da interface, a coesão e o coeficiente de atrito. Contudo, em todos os casos, a avaliação da rugosidade é realizada qualitativamente, podendo conduzir a resultados errados.

Estudos recentes demonstraram ser possível quantificar a rugosidade do substrato de betão e correlacioná-la com a resistência ao corte da interface entre este e a nova camada de betão [5], tendo sido desenvolvido e patenteado um método *in situ*, expedito e não destrutivo [6].

O método desenvolvido só pode ser utilizado com a superfície da interface acessível, i.e., antes de se aplicar a nova camada de betão. Por este motivo, considerou-se pertinente desenvolver um novo método que permita a medição, *à posteriori*, da rugosidade da superfície do substrato para verificar o cumprimento do valor preconizado em projecto.

### **1.2 Objectivos**

Pretende-se desenvolver um método não-destrutivo para medir a textura da superfície de um substrato após a aplicação de uma nova camada, sendo ambos de betão. Este método terá de ser baseado numa tecnologia que possibilite o atravessamento deste material. A tecnologia baseada na propagação de ondas em meio elástico surge, numa primeira análise, como a potencialmente mais interessante para o fim em vista. No entanto, baseando-se num fenómeno físico complexo, envolvendo normalmente a excitação de diversos tipos de ondas, decidiu-se iniciar este projecto de investigação com um estudo numérico, recorrendo ao Método dos Elementos de Fronteira para avaliar a viabilidade do método que se pretende desenvolver. Os objectivos deste estudo são: (1) identificar os diversos tipos de ondas que são excitadas no interior e à superfície do meio composto betão-betão em análise; (2) estudar a influência de parâmetros como a rugosidade da superfície da interface e o módulo de elasticidade das diferentes partes; e (3) analisar a precisão expectável do método e avaliar a sua viabilidade.

## **2. MÉTODO DOS ELEMENTOS DE FRONTEIRA**

### **2.1 Formulação do método**

A formulação do Método dos Elementos de Fronteira (BEM – *Boundary Elements Method*) utilizada na modelação de propagação de ondas é, hoje em dia, bem conhecida [7][8]. Neste artigo apresenta-se uma breve formulação do método, assim como a expressão que permite a modelação do campo de ondas incidente (*função de Green*). Posteriormente, indicam-se as condições de fronteira utilizadas na

implementação do algoritmo para modelar a geometria do problema (Figura 1) e, por último, explica-se como foi verificada a precisão do algoritmo.

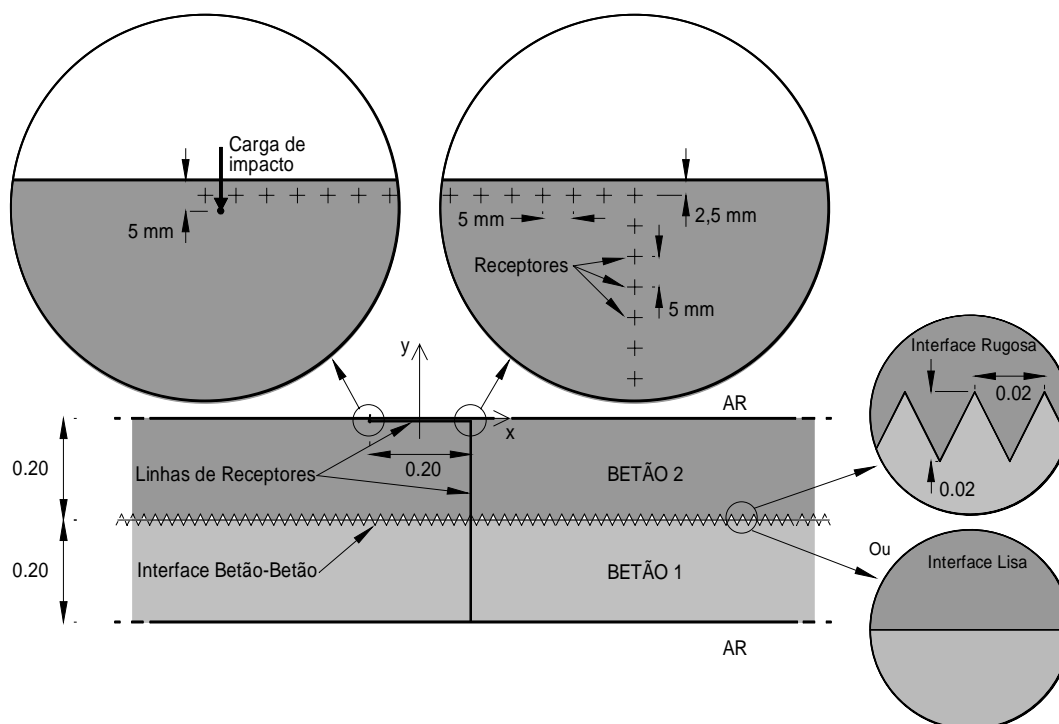


Figura 1. Geometria do modelo: laje constituída por duas camadas de betão com uma interface rugosa (ou lisa) excitada por uma carga de impacto aplicada na sua face superior.

O BEM pode ser formulado com base no *teorema da reciprocidade* ou *teorema de Betti*, obtendo-se uma equação que é habitualmente designada por *Equação Integral Fronteira*:

$$\int_S t u^* dS - \int_S t^* u dS = C_{PQ} u(x_P) \quad (1)$$

Para resolver esta equação é necessário conhecerem-se os deslocamentos ( $u^*$  ou  $G_{ij}$ ) e as tensões ( $t^*$  ou  $H_{ij}$ ) provocadas por uma carga unitária virtual aplicada num determinado ponto. Estas soluções denominam-se *funções de Green* ou *soluções fundamentais*.

A Eq. (1) pode escrever-se como:

$$\int_S t_j G_{ij} dS - \int_S H_{ij} u_j dS = C_{PQ} u_j(x_P) \quad (2)$$

onde  $G_{ij}$  e  $H_{ij}$  são os deslocamentos e as tensões, respectivamente, segundo a direcção  $j$  em  $Q$  (ponto a integrar), pertencente à fronteira, resultantes da força pontual unitária, com a direcção  $i$ , aplicada em  $P$  (ponto carregado).

Uma vez conhecida a solução fundamental  $G_{ij}$  (função de Green), as tensões virtuais ( $H_{ij}$ ) são obtidas através das derivadas das funções de Green (extensões) e posterior aplicação da Lei de Hooke. Dado que as integrações da Eq. (2) não têm, em geral, solução analítica conhecida, torna-se necessário recorrer à integração numérica, o que obriga a efectuar uma discretização da fronteira. Deste modo, quando a superfície é dividida em  $N$  elementos de fronteira, a Eq. (2) transforma-se em:

$$\sum_{Q=1}^N \int_{S_Q} t_j G_{ij} dS - \sum_{Q=1}^N \int_{S_Q} u_j H_{ij} dS = C_{PQ} u_j(x_P) \quad (3)$$

Para a obtenção do sistema de equações que permite resolver o algoritmo do BEM, é necessário que se aplique, de forma sucessiva, o carregamento virtual ao longo dos  $N$  elementos. Deste modo, a Eq. (3) é aplicada  $N$  vezes.

No interior dos elementos discretizados, os deslocamentos e tensões variam ao longo do seu comprimento. Esta variação é tida em consideração através da utilização de *funções de forma* ou *funções de interpolação* ( $\phi$ ). Neste trabalho são utilizados elementos de fronteira com funções de interpolação constantes.

As integrações necessárias para resolver a Eq. (3), são efectuadas analiticamente para o elemento carregado [9], enquanto que, se o elemento a integrar não coincidir com o elemento carregado, estas são realizadas de forma numérica, através da quadratura de Gauss.

## 2.2 Campo incidente

Considere-se um meio elástico homogéneo que possui densidade  $\rho$  e propriedades mecânicas que permitem uma velocidade de propagação de ondas de compressão  $\alpha$  e de ondas de corte  $\beta$ . Os meios acústicos confinantes possuem uma densidade  $\rho_f$  e permitem uma velocidade de propagação de ondas de pressão  $\alpha_f$ . Uma carga linear de impacto é aplicada na estrutura elástica numa posição com coordenadas  $x_0, y_0$ , com uma frequência de excitação  $\omega$ . O campo incidente bidimensional de deslocamentos para uma carga de impacto vertical pode ser expresso por [10]:

$$\begin{aligned} G_{xy} &= \gamma_x \gamma_y AB_2 \\ G_{yy} &= A \left[ k_s^2 H_{0\beta} - \frac{1}{r} B_1 + \gamma_y^2 B_2 \right] \end{aligned} \quad (4)$$

onde  $A = 1/(4i\rho\omega^2)$  representa a amplitude da onda de excitação;  $k_p = \omega/\alpha$  e  $k_s = \omega/\beta$  são os números de onda, respectivamente, das ondas de compressão e de corte;  $k_\alpha = \sqrt{k_p^2 - k_z^2}$ ,  $k_\beta = \sqrt{k_s^2 - k_z^2}$  sendo  $k_z$  o número de onda axial;  $\gamma_x = x/r$ ,  $\gamma_y = y/r$  são os cosenos directores;  $r = \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}$  é a distância entre a carga de impacto e o ponto onde os deslocamentos são calculados;  $B_n = k_\beta^n H_{n\beta} - k_\alpha^n H_{n\alpha}$ ;  $H_{n\alpha} = H_n^{(2)}(k_\alpha r)$  e  $H_{n\beta} = H_n^{(2)}(k_\beta r)$  são funções de Hankel. Neste trabalho são apresentados resultados para problemas bidimensionais puros, isto é, considerando um número de onda axial nulo ( $k_z = 0$ ). Por este motivo são apresentadas, na Eq. (4), funções de Green 2D (plano  $x, y$ ).

## 2.3 Condições de fronteira

Uma das vantagens do BEM reside no facto de apenas requerer a discretização das interfaces ou fronteiras existentes entre cada meio/material. Apresentam-se, de seguida, as condições de fronteira impostas em cada uma das interfaces modeladas.

### 2.3.1 Interface sólido-fluido

Ao longo da fronteira existente entre o meio fluido (ar) e o meio elástico (laje de betão), o sistema de equações necessário para a obtenção da solução é obtido impondo continuidade de deslocamentos normais e equilíbrio de tensões normais, assim como tensões tangenciais nulas.

### 2.3.3 Interface elástico-elástico

Na interface entre os meios sólidos elásticos que constituem a laje foi necessário impor a continuidade de deslocamentos e o equilíbrio de tensões, por forma a obter o sistema de equações necessário à obtenção das respostas.

## 2.4 Verificação da precisão do algoritmo

A precisão do algoritmo BEM foi verificada inicialmente por comparação com os resultados para uma inclusão circular cilíndrica, preenchida por um meio fluido ou elástico, inserida num meio elástico infinito, para a qual a solução analítica (exacta) é conhecida [11]. Posteriormente, o algoritmo foi

implementado na modelação de uma laje em betão que poderia ser constituída por um ou dois tipos de betão (com interface entre as duas camadas). Esta segunda verificação consistiu na modelação utilizando duas camadas de betão com iguais propriedades, tendo sido possível observar a ausência de qualquer descontinuidade nas respostas, devido à existência da interface, vindo as respostas iguais às obtidas para uma única camada de betão. A Figura 2 apresenta uma das respostas em frequência (100 kHz) obtidas durante o processo de verificação do algoritmo, para uma grelha regular de receptores colocados no plano vertical xy (0,20 x 0,40 m). Verifica-se que estas, tal como esperado, são praticamente iguais.

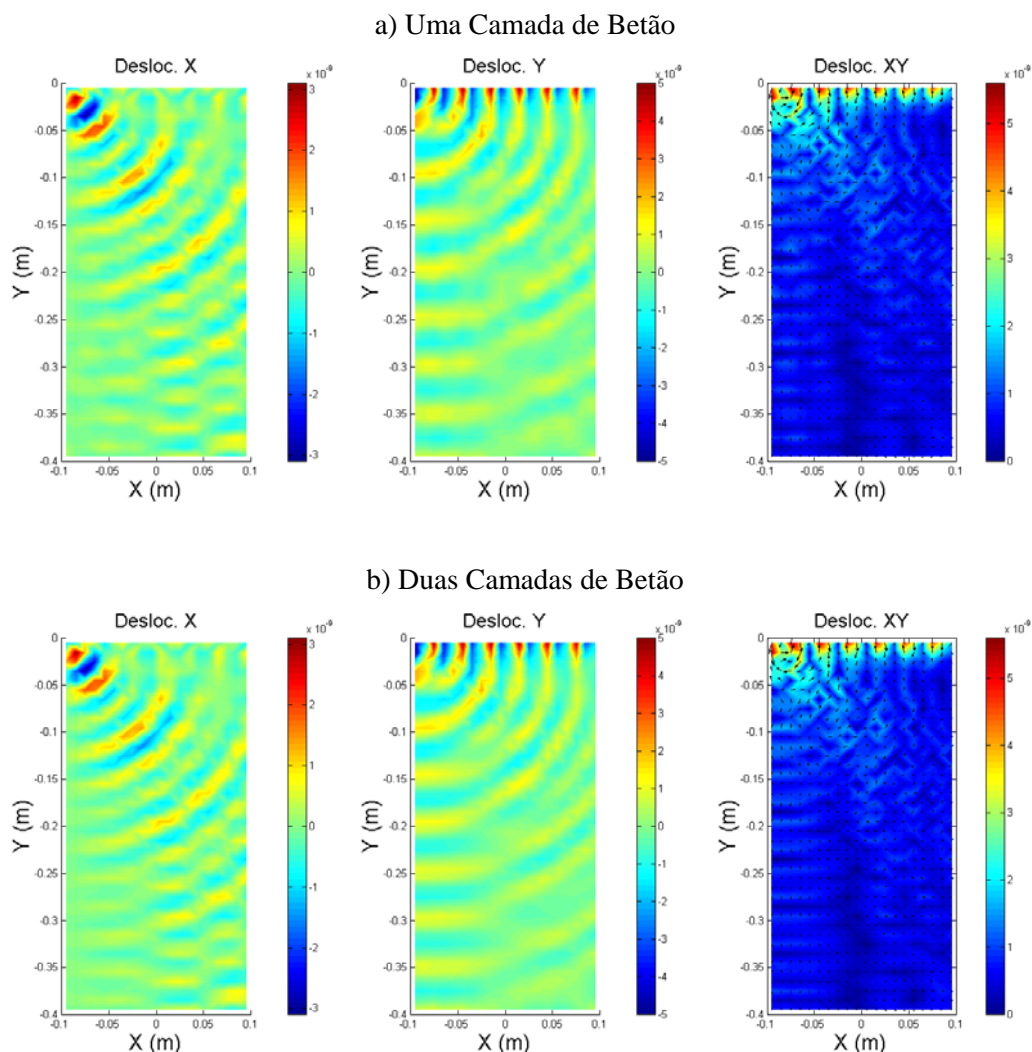


Figura 2. Verificação do algoritmo baseado no Método dos Elementos de Fronteira. Respostas obtidas numa grelha vertical de receptores, posicionados no interior da laje, para uma frequência de 100 kHz, considerando: a) uma única camada de betão (sem interface); b) duas camadas de betão (mas com propriedades mecânicas iguais).

### 3. RESPOSTAS NO DOMÍNIO DO TEMPO

Os resultados são inicialmente obtidos em frequência. Posteriormente, as respostas são convertidas para o domínio do tempo através da aplicação da inversa da transformada rápida de Fourier (FFT – *Fast Fourier Transform*). Considera-se que a fonte dinâmica excita pulsos no domínio do tempo, com a variação temporal de um pulso de Ricker, que possui a vantagem de decair rapidamente em frequência e no tempo, reduzindo o esforço de cálculo e permitindo uma interpretação mais fácil das respostas no tempo, dada a sequência de pulsos relativamente estreitos.

O pulso de Ricker, no domínio do tempo, pode ser dado pela seguinte função:

$$u(\tau) = A(1 - 2\tau^2)e^{-\tau^2} \quad (5)$$

onde  $A$  representa a amplitude,  $\tau = (t - t_s)/t_o$  e  $t$  representam o tempo;  $t_s$  é o tempo onde ocorre o máximo do pulso, e  $\pi t_o$  é o período característico (dominante) do referido pulso. A transformada de Fourier permite obter a mesma função, mas no domínio da frequência:

$$U(\omega) = A[2\sqrt{\pi}t_o e^{-i\omega t_s}] \Omega^2 e^{-\Omega^2} \quad (6)$$

em que  $\Omega = \omega t_o / 2$ .

O tempo total da resposta é dado por  $T = 2\pi / \Delta\omega$ , sendo  $\Delta\omega$  o incremento de frequência. Para evitar o fenómeno de “aliasing”, a análise é realizada utilizando frequências complexas, com a parte imaginária do tipo  $\omega_c = \omega - i\eta$  (com  $\eta = 0.7\Delta\omega$ ). No domínio do tempo, esta alteração é depois tida em conta, aplicando uma função exponencial do tipo  $e^{\eta t}$ , à resposta obtida [12].

#### 4. MODELAÇÃO NUMÉRICA

O BEM é aplicado, neste estudo, à modelação da propagação de ondas de alta frequência com o intuito de caracterizar a rugosidade da interface entre duas camadas de betão, através da análise das respostas obtidas. Para o efeito foi modelada uma laje com uma espessura total de 40 cm constituída por duas camadas de betão, conforme ilustrado na Figura 1. Foram consideradas duas interfaces com rugosidades distintas: uma lisa e outra bastante rugosa, modelada usando uma geometria triangular. A Figura ilustra igualmente a posição da fonte de excitação (carga de impacto vertical) e a localização das duas linhas de receptores (vertical e horizontal) afastados entre si 5 mm. As propriedades mecânicas dos materiais utilizados nesta modelação estão indicadas no Quadro 1.

Quadro 1. Propriedades mecânicas dos meios sólidos e fluido:  $E$  – módulo de elasticidade longitudinal;  $\alpha$  - velocidade de propagação das ondas de compressão;  $\beta$  - velocidade de propagação das ondas de corte;  $\rho$  - Massa volúmica;  $\eta$  - factor de perdas.

Meio	Sólido		Fluido
Material	Betão1	Betão2	Ar
$E$ [GPa]	27,0	61,0	-----
$\alpha$ [m/s]	3535	5314	340
$\beta$ [m/s]	2165	3254	-----
$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	2400	2400	1.22
$\eta$	$8 \times 10^{-3}$	$4 \times 10^{-3}$	-----

Os cálculos foram realizados no domínio da frequência, numa gama dos 2 kHz aos 256 kHz, com um incremento de 2 kHz. Conforme anteriormente referido, estas respostas foram convertidas para o domínio do tempo, através da aplicação da inversa da FFT. O incremento de frequência utilizado (2 kHz) determina uma duração total da resposta no tempo (T) de 0,5 ms. A carga dinâmica de impacto excita pulsos de Ricker com uma frequência característica de 100 kHz.

O número de elementos de fronteira utilizados na modelação, aumenta com a frequência de excitação da carga de impacto. O cociente entre o comprimento de onda das ondas incidentes e o comprimento dos elementos de fronteira é no mínimo igual a seis. No entanto, dada a reduzida distância entre os receptores e a superfície de fronteira da laje (2,5 mm), o comprimento dos elementos de fronteira nesta

zona central da laje é igual ou inferior à referida distância. Dada a extensão da laje (teoricamente infinita), utilizou-se uma estratégia, aplicada anteriormente noutras simulações com sucesso [13], para reduzir o número de elementos de fronteira necessários, permitindo assim alcançar frequências mais elevadas: o comprimento dos elementos de fronteira foi aumentado proporcionalmente à distância da zona central da laje onde as respostas são captadas. Desta forma, o rigor dos resultados obtidos não é significativamente afectado, uma vez que o contributo para a resposta final dos elementos de fronteira mais afastados da zona de excitação é igualmente menor. Tal como previamente referido, os resultados apresentados neste trabalho foram obtidos para um número de onda axial nulo ( $k_z = 0$ ), correspondendo ao problema bidimensional puro.

Na Figura 3 apresentam-se as respostas no domínio do tempo calculadas ao longo de uma linha de receptores colocada muito próximo da superfície superior da laje, para duas interfaces distintas: uma lisa e outra rugosa, conforme ilustrado na Figura 1. Estas respostas são referentes à amplitude de deslocamentos horizontais, verticais e o módulo de ambas as componentes. As diferenças entre as respostas para as duas rugosidades consideradas, são quase imperceptíveis.

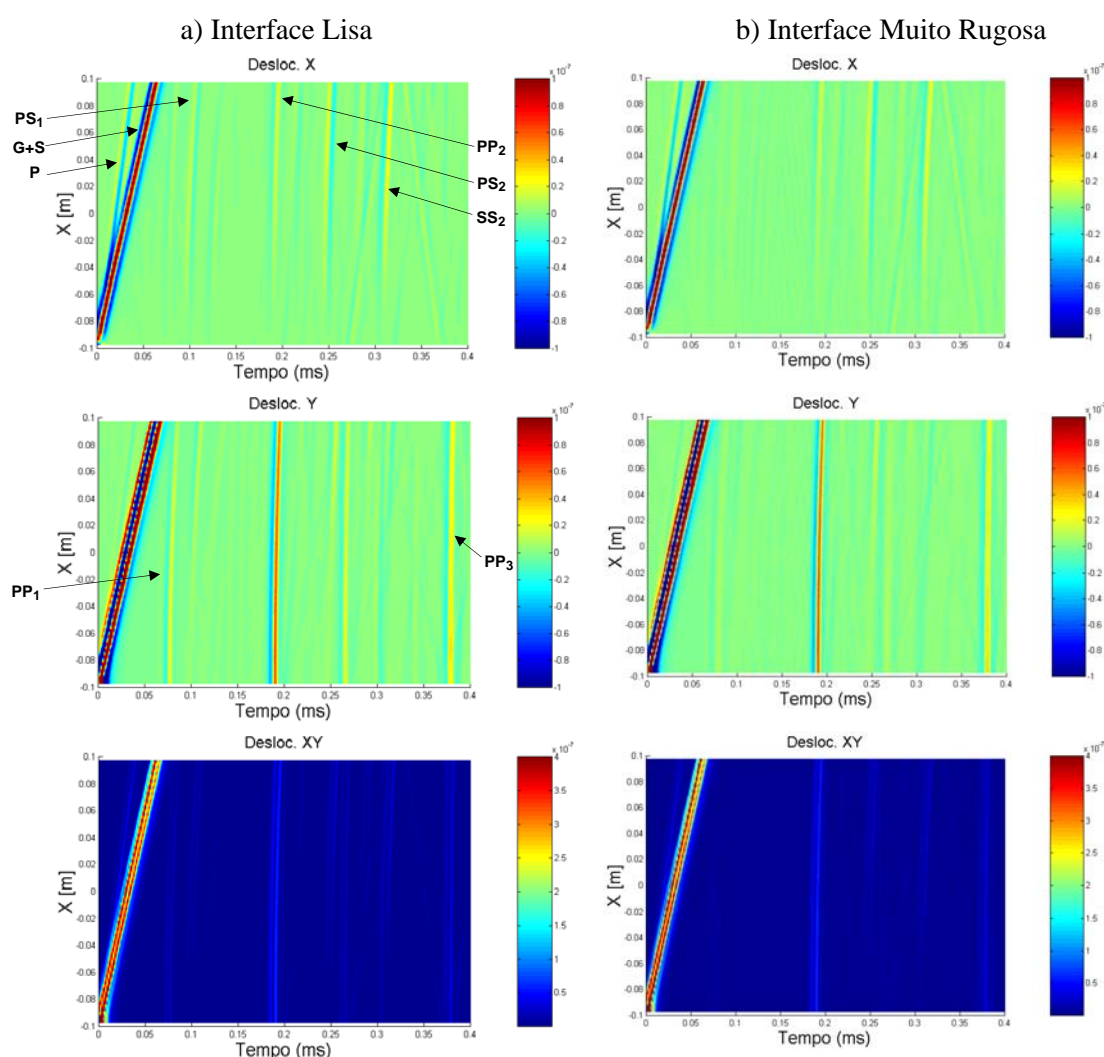


Figura 3. Respostas no domínio do tempo obtidas ao longo de uma linha horizontal de receptores colocados na superfície superior da laje para dois tipos de interface betão-betão: a) lisa; b) muito rugosa.

É visível a separação entre os dois pulsos iniciais para os pontos mais afastados da fonte de excitação. Tal como esperado, o primeiro pulso a atingir o receptor mais distante é originado pelas ondas de compressão ou dilatacionais (P), dado que possuem uma velocidade de propagação superior (5314 m/s). O segundo pulso é originado essencialmente pelas ondas de superfície, ou Guiadas (G),



embora também possam ter algum contributo das ondas de corte (S), dada a proximidade da velocidade de propagação de ambas (3254 e 2967 m/s respectivamente) e a reduzida distância percorrida (0.20 m). Saliente-se que os tempos de chegada dos pulsos correspondem ao previsto, considerando a distância percorrida e a velocidade de propagação de cada tipo de onda.

Comparando a amplitude dos deslocamentos segundo as duas direcções calculadas, verifica-se que, tal como seria de prever, a componente vertical dos deslocamentos associados à propagação da onda P é muito reduzida (quase nula), enquanto que para as ondas S e G, é mais importante do que a sua componente horizontal [13].

Para além destes dois pulsos iniciais surgem, posteriormente, outros que resultam da reflexão e refacção das ondas na interface entre as duas camadas de betão e nas superfícies inferior e superior da laje. Para permitir uma melhor identificação e compreensão da forma como estas ondas se propagam em profundidade, foi considerada uma linha vertical de receptores no interior da laje, alinhada com o receptor mais afastado da fonte, apesar de, experimentalmente, estas respostas não serem fáceis de obter. Os resultados correspondentes são apresentados na Figura 4.

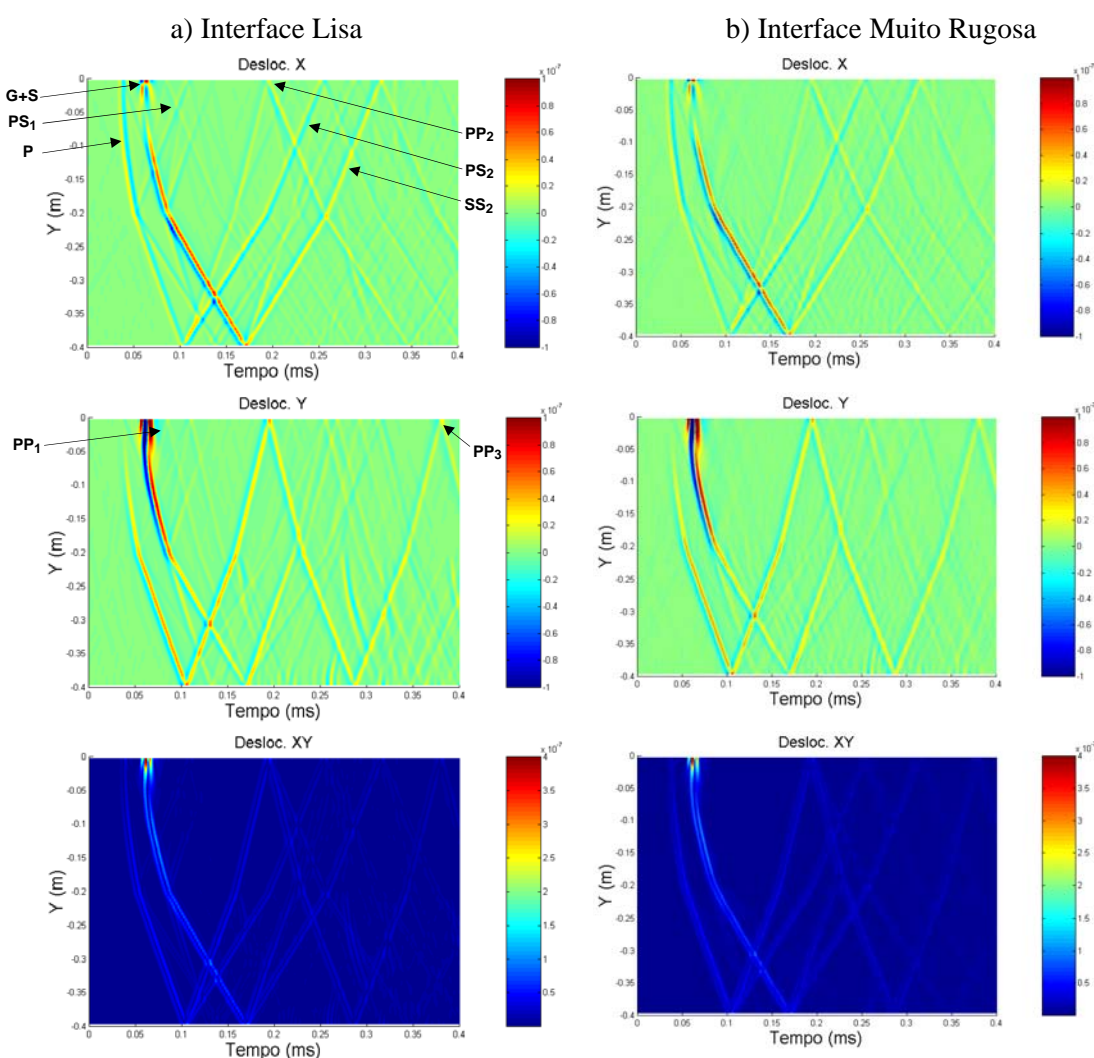


Figura 4. Respostas no domínio do tempo obtidas ao longo de uma linha vertical de receptores posicionados no interior da laje para dois tipos de interface betão-betão: a) lisa; b) muito rugosa.

Observa-se que existe uma descontinuidade nas respostas obtidas a 20 cm de profundidade. Este fenómeno era expectável devido à existência da interface entre as duas camadas de betão com diferentes impedâncias, o que origina a reflexão e refacção das ondas incidentes. Dado que a



velocidade de propagação das ondas é menor na camada inferior da laje de betão, verifica-se que há uma descontinuidade na trajectória do respectivo pulso, resultando num atraso, i.e., o pulso demora mais tempo a percorrer a mesma distância. Quando as ondas se propagam da camada inferior para a camada superior da laje de betão, ocorre o fenómeno inverso.

Através da análise da Figura 4, é possível identificar o pulso  $PP_1$  resultante da reflexão da onda P na interface betão-betão. Para além desta reflexão primária, a onda P é igualmente refractada para a camada inferior, sendo posteriormente reflectida na face inferior e refractada novamente pela interface para a camada superior, onde é registada nos receptores colocados à superfície, sendo identificada como o pulso  $PP_2$ . Note-se que, tal como se pode observar pelas Figuras 3 e 4, a componente vertical deste pulso é a mais relevante.

Uma onda P (ou mesmo S) ao incidir sobre uma descontinuidade (interface ou superfície externa da laje) será reflectida (e/ou refractada), dando origem a dois tipos de ondas (P e S; ou S e P). Na Figura 4 é possível observar este fenómeno nas respostas obtidas, estando os pulsos que atingem a superfície superior da laje identificados como  $PS_1$ , ou  $PS_2$  consoante a reflexão seja na interface betão-betão ou na superfície inferior da laje, respectivamente. Repare-se que, tal como esperado, os pulsos reflectidos na superfície inferior da laje possuem uma amplitude muito superior aos reflectidos na interface betão-betão, dado o muito maior contraste de impedância existente entre o betão e o ar. Por este motivo, o pulso  $PP_2$  possui um sinal consideravelmente mais forte do que o  $PP_1$ , apesar da distância percorrida ser maior.

Falta explicar a origem do pulso identificado, nas Figuras 3 e 4, como  $SS_2$ . Através da observação da Figura 4, em particular os resultados referentes aos deslocamentos horizontais, é possível verificar que este pulso resulta da reflexão da onda S na face inferior da laje. Refira-se ainda que o pulso  $SS_1$ , originado pela reflexão da onda S na interface betão-betão, é praticamente imperceptível à superfície da laje e, por este motivo, não está assinalado nas Figuras 2 ou 3.

Analisando a Figura 3, no que se refere aos deslocamentos horizontais, é possível verificar que, tal como esperado, os pulsos registados à superfície da laje correspondentes às ondas reflectidas e refractadas, são praticamente nulos na proximidade do ponto de aplicação da carga, aumentando a sua importância com o incremento da distância à mesma.

Tal como referido anteriormente, as diferenças entre as respostas para uma interface lisa e rugosa são quase imperceptíveis. No entanto, uma análise mais minuciosa permite verificar que existem algumas diferenças, nomeadamente no que diz respeito aos pulsos ( $PP_1$  e  $PS_2$ ) originados pelas ondas reflectidas na interface betão-betão. Estes pulsos, para uma interface lisa (Figuras 3a e 4a), apresentam uma amplitude muito reduzida, enquanto que, no caso da interface rugosa (Figuras 3b e 4b), praticamente desaparecem. Este facto pode ser justificado pela maior dispersão da energia reflectida pela interface rugosa. Esta é, efectivamente, a única diferença significativa encontrada nas respostas.

## **5. CONCLUSÕES**

Neste estudo foi implementado um algoritmo baseado no BEM para simular a propagação de ondas de alta frequência, numa laje constituída por duas camadas de betão, com o objectivo de avaliar a viabilidade de desenvolvimento de um método ultra-sónico, de aplicação *in situ* e não destrutivo, para medição da rugosidade da interface entre ambas as camadas. Os cálculos foram realizados no domínio da frequência sendo as respostas posteriormente convertidas para o domínio do tempo, através da aplicação da inversa da FFT. Com base nos resultados numéricos obtidos foi possível analisar e identificar diversos tipos de ondas que são excitadas no interior da laje - ondas de compressão (P) e de corte (S) - e também à superfície da mesma - ondas guiadas G. Constatou-se ainda que, apesar do elevado contraste de impedância entre os dois materiais que formam a interface betão-betão em estudo e da grande rugosidade modelada ao longo da mesma, as diferenças nas respostas obtidas são muito

ténues. Uma análise mais pormenorizada permitiu detectar pequenas diferenças, as quais foram registadas nos pulsos gerados pelas ondas reflectidas na interface, podendo ser justificadas pela maior dispersão da energia reflectida por esta, no caso de superfície rugosa. No entanto, o estudo realizado leva a admitir que, pelo menos na gama de frequências utilizada (100 kHz), não será viável o desenvolvimento do método proposto.

## REFERÊNCIAS

- [1] BIRKELAND, P.W.; BIRKELAND, H.W. - Connections in Pre-cast Concrete Construction. ACI Journal, 1966. 63, (3), p. 345-367.
- [2] CEB-FIP MODEL CODE 1990, "Model Code for Concrete Structures", Comité Euro-International du Béton, Secretariat Permanent, Case Postale 88, CH-1015 Lausanne, Switzerland.
- [3] EURO-CODE 2: Design of concrete structures – Part 1.1: General rules and rules for buildings, Dec 2004.
- [4] ACI 318-95, "Manual of Concrete Practice, Part 3: Use of Concrete in Buildings - Design, Specifications and Related Topics", 1996.
- [5] SANTOS, P., JÚLIO, E., SILVA, V. D. - Correlation between Concrete-to-Concrete Bond Strength and the Roughness of the Substrate Surface, Elsevier, Construction and Building Materials 21 (8): 1688-1695 AUG 2007.
- [6] SANTOS, P., JÚLIO, E. - Development of a Laser Roughness Analyzer to Predict In Situ the Bond Strength of Concrete-to-Concrete Interfaces, Thomas Telford, Magazine of Concrete Research 60 (5): 329-337 JUN 2008.
- [7] MANOLIS, G.D.; BESKOS, D.E. - Boundary Element Methods in Elastodynamics. Unwin Hyman (sold to Chapman and Hall), London, 1988.
- [8] SANTOS, P.F.A. - Propagação de Ondas Geradas por Fontes 3D na Presença de Meios 2D Através do Método dos Elementos de Fronteira. Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Coimbra, 2004, Tese de Doutoramento.
- [9] SANTOS, P.F.A. - Reflexão e Difracção de Ondas em Estruturas Enterradas. Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Coimbra, 1998, Tese de Mestrado.
- [10] TADEU, A.; KAUSEL, E. - Green's functions for two-and-a-half dimensional elastodynamic problems. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 2000. 126(10), p. 1093-1097.
- [11] PAO, Y.H.; MOW, C.C. - Diffraction of Elastic Waves and Dynamic Stress Concentrations. Rand Corporation, 1973.
- [12] KAUSEL, E.; ROESSET, J.M. - Frequency domain analysis of undamped systems. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 1992. 118(4), p. 721-734.
- [13] SANTOS, P.; TADEU, A. - Scattering of seismic waves generated by an irregular seabed. Computers and Structures, 2004. 82(22), p. 1793-1804.